Ken Dobson
David Grace
David Lovett

Fizika

11–12 klasei

2 dalis

Ken Dobson
David Grace
David Lovett

Fizika

Išplėstinis ir tikslinis kursai

11–12 klasei

2 dalis

alma littera
Vilnius 2002

TURINYS

BANGOS, KVANTAI IR ATOMAI

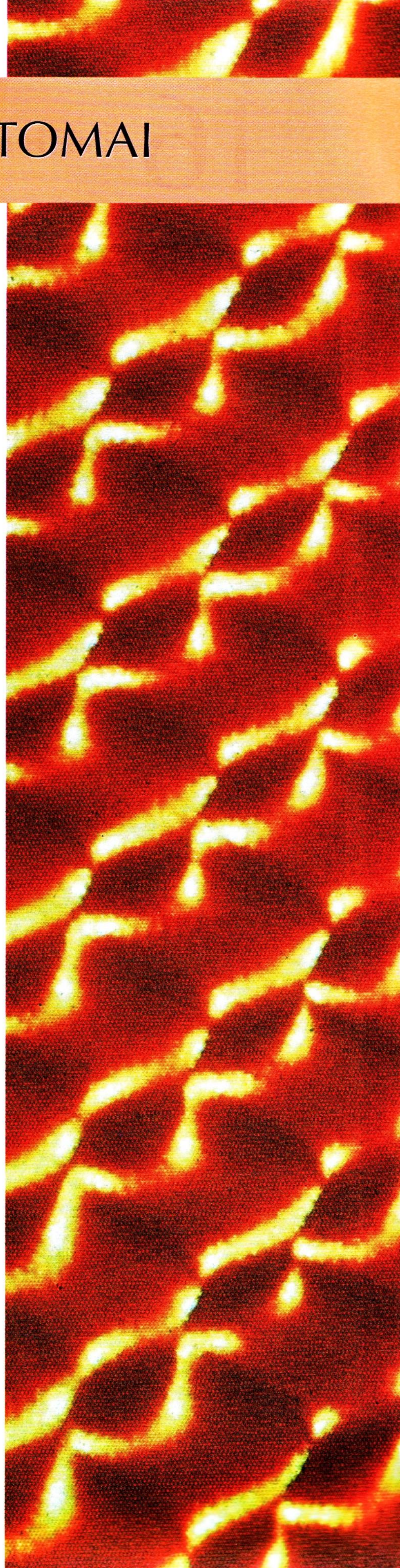
FIZIKA VALDYMO IR KOMUNIKACIJOS PROCESUOSE

ŽMONIŲ PLANETOS FIZIKA

FIZIKOS PRIEŠAKINIS FRONTAS

PRIEDAI

BANGOS, KVANTAI IR ATOMAI



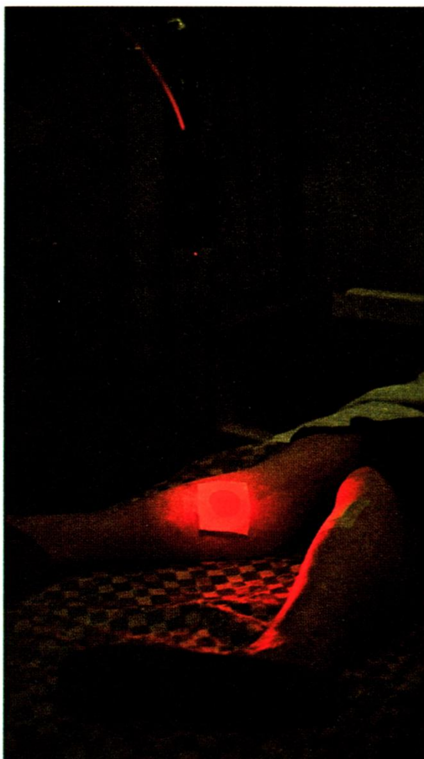
Galbūt ir nėra akivaizdu, kad šviesa, rentgeno spinduliai ir radijo bangos – tai tos pačios rūšies spinduliuotė, t.y. elektromagnetinės bangos. Taip pat nelabai aiškus ir jų ryšys su elektromagnetiniais reiškiniais, nagrinėjamais I dalies skyriuose, kurių bendras pavadinimas „KRŪVIS: SROVĖ IR LAUKAI“. Todėl čia aptarsime, kaip susijusios šios sąvokos.

Elektromagnetinė spinduliuotė yra bangos, ir remdamiesi bangų savybėmis paaiškinsime lūžimo, difrakcijos, interferencijos ir poliarizacijos reiškinius. Tačiau, savo nuostabai, pasigilinę įsitikinsime, kad elektromagnetinis spinduliavimas pasižymi ir dalelių, kurias vadiname fotonais, savybėmis. Jos atsiskleidžia nagrinėjant atomo sandarą ir energijos kvantavimą.

Sužadinti atomai ima spinduoliuoti tam tikrą spektrą, pagal kurį galima gauti labai daug informacijos apie atomo sandarą. Radioaktyvūs atomų branduoliai taip pat yra spinduliavimo šaltinis. Radioaktyvumo tyrinėjimai ne tik paskatino sukurti branduolinę energetiką ir branduolinę mediciną (medicinos fizika gvildenama 24 skyriuje), bet ir padėjo geriau suvokti materijos prigimtį (tai nagrinėjama 26 skyriuje „Giliausieji materijos klodai“).

Mūsų akys skiria šviesą tik siauroje elektromagnetinio spektro srityje – smegenys suvokia tinklainėje sudarytus atvaizdus. Dabar jau esama prietaisų, kurie gali sukurti informatyvius atvaizdus naudodami bet kurios elektromagnetinio spektro srities bangas, – nesvarbu, ar jas skleidžia pavieniai lydinio atomai, ar prieš milijardus metų išspinduliavo kvazarai. Tad šios dalies pabaigoje apžvelgsime atvaizdų kūrimo, išsaugojimo ir atkūrimo būdus.

16 Elektromagnetinė spinduliuotė



Fotodinaminė terapija: ligonio kojos vėžiniame audinyje kaupiasi dažai, ir tada koja švitinama lazerio spinduliuote, kuri sunaikina vėžio ląsteles

Gyvybė Žemėje labai priklauso nuo chlorofilo. Ši medžiaga gali sąveikauti su Saulės spinduliuotės raudona šviesa. Vykstant fotocheminei reakcijai chlorofilo elektronai įgyja energijos ir suaktyvina reakcijų grandinę, kuriai vykstant iš aplinkos vandens ir anglies dioksido susintetinami angliavandeniai ir išsiskiria laisvas deguonis.

Pastaruoju metu fotocheminės reakcijos yra taikomos vėžiui gydyti; ši procedūra vadinama fotodinamine terapija (FDT). Jos veikimo principas analogiškas chlorofilo susidarymo procesui. Pacientai gauna nekenksmingų vaistų, kurie susikaupia vėžiniuose audiniuose. Vaistai įeina į labai sudėtingą chlorofilo molekulę ir veikia kaip šviesą sugeriantys dažai. Apšviesti balta šviesa, jie sugeria tiktai tam tikro dažnio bangas, todėl dažų atspindėta šviesa yra tam tikros spalvos; panašiai lapai esti žali todėl, kad žalia šviesa yra, galima sakyti, balta be raudonos.

FDT skirtas šviesą generuojantis lazeris suderinamas tokiam dažniui, kurį sugeria vaistai. Lazeris spinduliuoja mažos energijos raudonos šviesos dozes, kurios gali prasiskverbti gana giliai ir paprastiems audiniams nekenkia. Gydymo esmę sudaro sugerta spinduliavimo energija.

Gydant ligšioliniais metodais lazerio spinduliuotė sunaikindavo visas spindulių paveiktas ląsteles – tiek sveikas, tiek vėžines. Taikant FDT fotocheminėms reakcijoms sužadinti pakanka mažesnės energijos spinduliuotės, susitelkiančios vaistuose; vykstant reakcijai išsiskiria pavieniai deguonies atomai, kurie veikia kaip nuodai. Priešingai nepavojingoms dviatomėms deguonies molekulėms, kuriomis kvėpuojame, pavieniai deguonies atomai pasižymi labai dideliu cheminiu aktyvumu ir gali nužudyti gyvas ląsteles. Fotodinaminė terapija tuo ir veiksminga, kad pavojingi deguonies atomai kaupiasi tik toje srityje, kurioje sugerti dažai, taigi sunaikinamos tik vėžinės ląstelės.

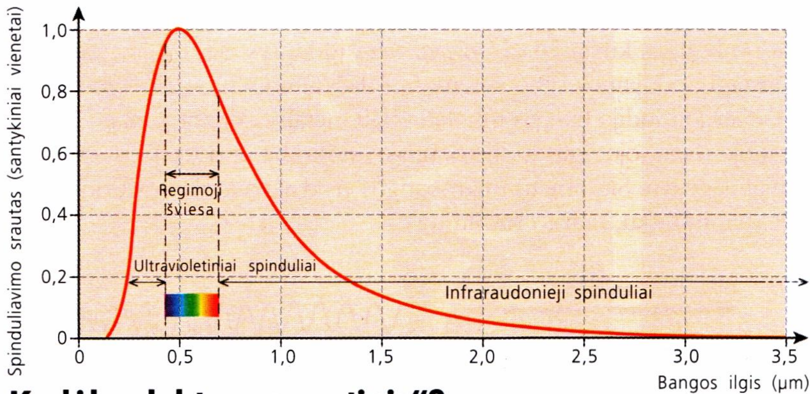
Elektromagnetinė Visatos dalis

Galima teigti, kad Visata – tai medžiaga plius elektromagnetinis spinduliavimas. Šviesa yra tik nedidelė (regimoji) elektromagnetinio spinduliavimo dalis. Spinduliavimas turi ir **bangų**, ir **korpuskulų** (dalelių) savybių. Korpuskulinis elektromagnetinio spinduliavimo, kaip **fotonų** srauto, aspektas nagrinėjamas 17 skyriuje, kuriame aptariama kvantinė teorija. Taip pat fotonai nagrinėjami 26 skyriuje, kuriame daugiau supažindinama su dalelėmis, sudarančiomis mus supantį pasaulį.

Šiame skyriuje nagrinėsime spinduliavimo, sukuriančio **elektromagnetinį spektrą**, **banginį** aspektą, spinduliavimo greitį, kaip šis spinduliavimas sukeliamas ir išmatuojamas, taip pat spinduliavimo banginių savybių panaudojimą. Tam išsiaiškinsime **difrakciją**, **interferenciją** ir **poliarizaciją**. (Elektromagnetinės spinduliuotės kaip informacijos nešiklio naudojimą aptarsime 21 skyriuje.)

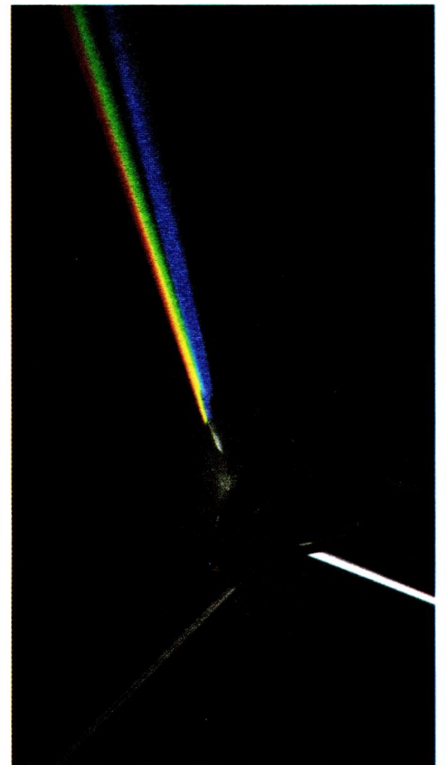
1 ELEKTROMAGNETINIS SPEKTRAS

Labai karšti kūnai, tokie kaip žvaigždės, panašiai kaip Saulė, spinduliuoja įvairaus ilgio bangas (žr. 16.1 pav.). **Šviesa** yra mūsų akių užfiksuojama labai menka tos spinduliuotės dalis. Baltą šviesą galima išskaidyti į kelių spalvų sritis, kurios visos kartu sudaro baltos šviesos **spektrą** – nuo violetinės šviesos, kurios bangos ilgis apie 4×10^{-7} m, iki raudonos, kurios bangos ilgis apie 4×10^{-7} m.



16.1 pav. **Ištisinis Saulės spinduliuotės spektras**

16.2 pav. **Prizmė išskaido baltą šviesą į mūsų regimą spalvotą spektrą**



Kodėl „elektromagnetinis"?

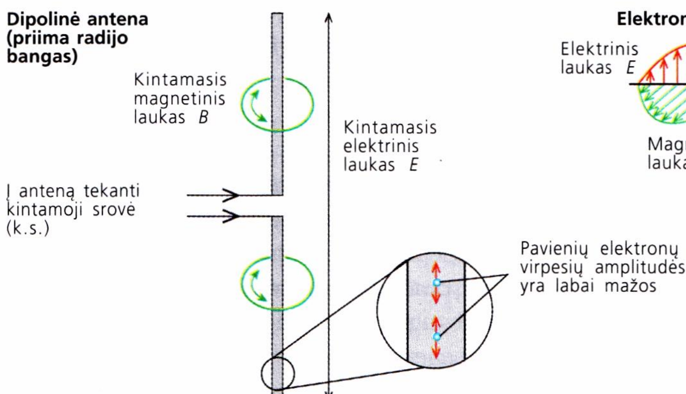
Spinduliuotė sukuriama ir aptinkama *stabdant arba greitinant laisvuosius elektronus* (arba kartais ir kitas, krūvį turinčias daleles) arba elektronams *staiga pereinant į kitą vietą* (elektronų šuoliai elektroniniuose apvalkaluose). Pavyzdžiui, **radijo signalą** generuoja elektronai, kurie verčiami virpėti siųstuvo antenoje, kaip pavaizduota 16.3 pav. Šis procesas sužadina dviejų susijusių – elektrinio ir magnetinio – laukų virpesius elektronų srovės dažniu. Taigi galime tarti, kad **elektrinį lauką** kuria elektronų krūvis.

Magnetinis laukas sukuriamas judant krūviams, ir jis yra proporcingas srovės stipriui (žr. 1-os d. 246 p.).

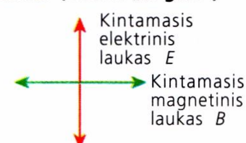
Nuostabiausia (ir sunkiausiai paaiškinama) yra tai, kad šie susiję laukai sklinda iš antenos vakuume vienodu greičiu, nepriklausomu nuo dažnio. Tai **šviesos greitis** c. Laukai *sklinda kaip bangos*: jie gali *difraguoti*, jie *sąveikauja* vienas su kitu, todėl stebima *interferencija*, be to, jie gali būti ir *poliarizuoti*. Šias sąvokas išsiaiškinsime vėliau.

Kai bangos pasiekia kitą metalinį strypą (imtuvo anteną), elektrinė elektromagnetinio lauko dedamoji *paveikia* kintamąja elektrine jėga metale esančius elektronus, kurie pradeda virpėti taip pat, kaip kinta laukas.

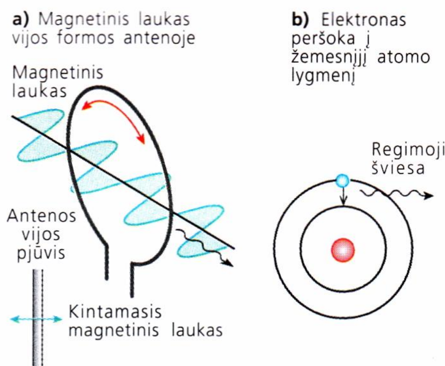
Vijos formos metalinė antena, kaip pavaizduota 16.4 pav., „pagauna" kintamąjį elektromagnetinės bangos magnetinį lauką ir pagal **elektromagnetinės indukcijos dėsnį** vijoje indukuojama ev.







16.3 pav. **Elektronai radijo siųstuvo antenoje ir su pagreičiu judančių elektronų sukurtos elektromagnetinės bangos**



16.4 pav. a) **Vijos formos antena „sugauna" elektromagnetinę bangą, nes kintamasis magnetinis laukas uždaroje vijoje indukuoja elektros srovę.** b) **Elektronai atomuose peršokdami iš aukštesnės energijos lygmens į žemesnįjį sukuria šviesą**

Infraraudonoji spinduliuotė, šviesa bei trumpesnių nei regimojo spektro bangų ilgių spinduliuotė taip pat susidaro judant atomuose elektronams (žr. 16.4b) pav.). Plačiau apie tai rasite 17 skyriuje.

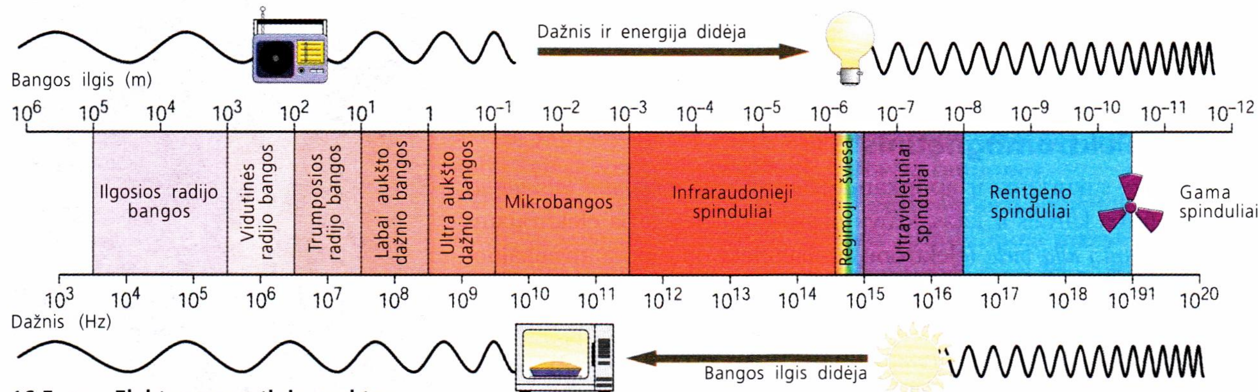
Elektromagnetinių bangų sukūrimas ir aptikimas

Elektromagnetinės bangos yra suskirstytos į penkis bangų ilgių intervalus pagal jų būdingus ypatumus (16.5 pav.).

Radijo bangos

Radijo bangas kuria laisvi, *su pagreičiu* judantys elektronai; jos daugiausiai naudojamos ryšio sistemose (plačiau apie tai – 21 skyriuje).

Generuoti radijo bangas išmokta 1930 metais bandant panaudoti medicinoje trumpojo ilgio radijo bangas – **mikrobangas** – pažeistiems audiniams gydyti. Šiuo metu mikrobangos vis dar naudojamos fizioterapijoje, na, ir, aišku, maisto ruošimui.



16.5 pav. **Elektromagnetinis spektras**

Radarai

Galimybė šias trumpas radijo bangas panaudoti karo lėktuvams aptikti ir nustatyti jų padėtį erdvėje buvo netrukus pritaikyta radarams (***ra**dio **d**etection **a**nd **r**anging*). Radarais, dar kitaip vadinamais radiolokatoriais, kūno padėtis nustatoma pagal laiką, per kurį atsispindėjusi banga grįžta į šaltinį. Radaro siųstuvuose (16.6 pav.) elektronai virpa mažose metalinėse ertmėse – *magnetronuose*, kuriuose sudarytas stiprus magnetinis laukas.

Magnetronuose sukurtų bangų dažnis priklauso nuo ertmės matmenų ir magnetinio lauko stiprio – jie nulemia elektrono svyravimų periodo trukmę. Bangos išleidžiamos iš ertmės pro metalinį vamzdį, vadinamą *bangolaidžiu*. Metalinės jo sienelės atspindi bangas ir priverčia jas judėti reikiama kryptimi link mažos antenos, kuri yra metalinio veidrodžio židinyje. Iš čia bangos išspinduliuojamos kryptingu pluošteliu. Siųstuvo antena ir veidrodis taip pat gali veikti kaip pagrindiniai spinduliuotės *imtuvai*, kurių židinyje yra detektorius.

?

A Kaip, remdamiesi dviejų TV antenų (vija ir strypas) pavyzdžiu, pagrįstumėte teiginį, kad TV signalai yra ir elektriniai, ir magnetiniai?



16.6 pav. **Antena-radaras Heathrow oro uoste žemei ir erdvei žvalgyti**

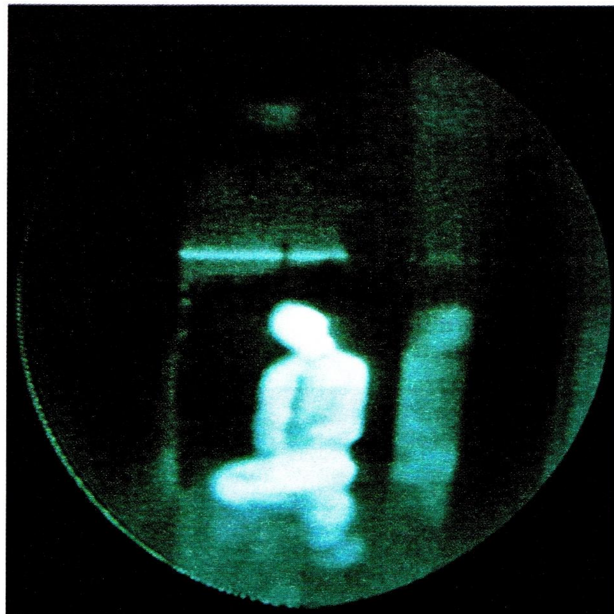
Mikrobanginės krosnelės

Panašūs magnetronai yra naudojami **mikrobanginėse krosnelėse**. Jose parenkamas toks mikrobangų dažnis, kad atitiktų rezonansinį vandens, riebalų ar cukraus molekulių virpėjimo dažnį. Mikrobangos prasiskverbia pro indą su maistu, tačiau atsispindi nuo metalinių krosnelės sienelių. Molekulės verčiamos virpėti, ir bangos gerai susigeria, o sugertoji energija padidina molekulių šiluminę energiją. Dėl to pakyla bet kokio maisto, kuriame yra mikrobangas absorbuojančių molekulių, temperatūra.

Infraraudonoji spinduliuotė



16.7a) pav. **Gelbėtojai ieško gaisrų ar Žemės drebėjimų nuniokotose vietose žmonių, naudodamiesi prietaisais, fiksuojančiais aukos kūno šiluminę spinduliuotę**



16.7b) pav. **Aukos atvaizdas infraraudonuosiuose spinduliuose**

Infraraudonoji (IR) spinduliuotė elektromagnetinių bangų spektre (16.5 pav.) persikloja su trumposiomis mikrobangomis; praktiškai tai karštojo kūno (neregima) spinduliuotė, prasidedanti tuoj už regimosios raudonos šviesos elektromagnetinių bangų spektre. Infraraudonuosius spindulius lengvai sugeria medžiagos molekulės (jie skatina molekulių šiluminį judėjimą), todėl medžiagų temperatūra pakyla.

Kadangi žmogaus oda yra jautri artimosios IR srities spinduliuotei, tai ji yra paprasčiausias tokių spindulių jutiklis – mes jaučiame „šilumą“. Termometras su pajuodintu galu (arba jutiklio paviršiumi) fiksuos pakilusią temperatūrą, jei bus padėtas baltos šviesos spektro raudonojoje srityje. Tačiau dar daugiau temperatūra pakils, jei termometrą pastumsime į tamsiąją sritį, esančią tuoj už regimosios raudonos šviesos – tai 1800 m. pirmasis pademonstravo astronomas seras V. Heršelis (*William Herschel*, 1738–1822, Vokietija, Britanija).

Specialioje IR spinduliams jautrioje fotojuostoje galima sudaryti šiluminius atvaizdus, tačiau tokias juostas sudėtinga naudoti, todėl paprastai taikomos elektroninės priemonės. Moderniuose infraraudonųjų spindulių detektoriuose naudojami kietakūniai (elektroniniai) jutikliai, kurie veikia panašiai kaip televizijos kameros. Pramonėje jais stebimi procesai, kurie sukelia temperatūrų skirtumus. Taip pat šie detektoriai naudojami Žemės palydovuose ne tik karo, bet ir taikiems tikslams, pavyzdžiui, stebėti javų augimą, matuoti Žemės paviršiaus temperatūrą ir pan. (žr. 1-os d. 68 p. ir 23 skyrių). Galima pagaminti infraraudonuosius detektorius, jautrius tik siauriam bangų ilgių intervalui: tokiomis specialiomis gelbėjimo kameromis galima aptikti gaisrų ar Žemės drebėjimų aukas (16.7 pav.), nes naudojami detektoriai yra jautriausi tiems IR spinduliams, kurie atitinka žmogaus kūno temperatūrą.

Elektroniniai prietaisai (pvz., puslaidininkiniai šviesos diodai) taip pat skleidžia infraraudonuosius spindulius ir naudojami nuotoliniam elektroninių prietaisų, tokių kaip televizoriai, vaizdo ir garso grotuvai, valdymui.

?

B Nurodykite priežastis, kodėl **a)** į uždarą metalinį indą sudėtas maistas mikrobanginėje krosnelėje nesušyla, **b)** tuščia stiklinė arba plastmasinė dėžutė mikrobanginėje krosnelėje neįkaista.

■ Žr. 1 klausimą.



16.8 pav. **Rankinis nuotolinio valdymo įtaisas perduoda IR signalą įrenginiui**



16.9a) pav. **Ultravioletiniai žaibai yra naudojami specialiems scenos efektams sukurti**



16.9b) pav. **Sulaužyto rankos kaulo atvaizdas rentgeno spinduliuose**

Šviesa

Regimąją spinduliuotę registruoja žmonių bei gyvūnų akys, taip pat įvairiausi jautrūs prietaisai – paprasta fotojuostelė, įvairūs fotoelektriniai elementai ir labai jautrūs surištųjų krūvių elementai. Plačiau apie šviesai jautrius prietaisus ir šviesos valdymą sužinosite 19 skyriuje.

Trumpabangis ir jonizuojantysis spinduliavimas

Ultravioletinę (UV) **spinduliuotę** sukelia elektronų šuolis iš vieno energijos lygmens į kitą atomuose, ir, kaip matysime vėliau, labai karštų kūnų spinduliavimas. UV spinduliai buvo atrasti 1801 m. vienu iš pirmųjų fotocheminių eksperimentų, tyrinėjant sidabro chlorido pajuodavimą šviesoje. Paaiškėjo, kad egzistuoja kažkokie spinduliai, esantys tolimesnėje spektro srityje už regimąją violetinę šviesą, kurie sukelia stipresnį sidabro chlorido pajuodavimą nei regimoji šviesa. Vėliau išsiaiškinsime, kad *trumpesnis bangos ilgis atitinka didesnės energijos spinduliuotę*, todėl UV spinduliai smarkiai veikia eksponuojamą fotografinę plokštelę. UV spinduliai labai tinka gaminti švytinčioms cheminėms medžiagoms, vadinamoms *fosforescuojančiomis*. Mažo intensyvumo UV spinduliai naudojami specialiems scenos efektams sukurti (16.9a) pav.). Tačiau reikia prisiminti, kad šių spindulių energija yra pakankama atomų jonizacijai, todėl gali pažeisti gyvus audinius, pavyzdžiui, sukelti nudegimus ar odos vėžį.

Rentgeno spindulių bangos ilgis dar mažesnis nei ultravioletinių. Jie gaunami smarkiai stabdant elektronus, pavyzdžiui, kai dideliu greičiu lekiančių elektronų pluoštelis susiduria su metaliniu taikiniu ir yra sustabdomas. Juos visai netikėtai atrado Viljamas Rentgenas (*William Röntgen*, 1845–1923, Vokietija). Jis eksperimentavo su katodiniais spinduliais (elektronų pluošteliais išretintoje erdvėje) ir pastebėjo, kad jie sukėlė fosforu padengto ekrano, esančio kelių metrų atstumu nuo katodinių spindulių vamzdžio, švytėjimą. Jis iškart suprato, kad šie spinduliai gali prasiskverbti pro minkštuosius audinius, tačiau juos sulaiko tankesnės medžiagos, tokios kaip metalai ar kaulai. Jau po kelių savaičių nuo šio atradimo rentgeno spinduliai buvo pradėti naudoti ligoninėse diagnozei ir gydymui. Tačiau tai, matyt, vyko pernelyg sparčiai, dar nesuvokiant žalingo šių spindulių jonizuojančiojo poveikio, todėl daugelis tyrinėtojų mirė nuo spindulinės ligos.

Šiuo metu rentgeno spinduliai vis dar naudojami įvairiose srityse, pavyzdžiui, medicinoje ligų diagnozei (žr. 24 skyrių), pramonėje ir statyboje plyšiams metaliniuose kūnuose aptikti. Rentgeno spinduliams svarbiausias vaidmuo teko kristalografijos moksle, kai buvo tiriama kristalinė kietųjų kūnų sandara. Vienas iš įdomiausių pastarojo meto rentgenografijos pasiekimų yra DNR struktūros atradimas.

Gama (γ) spinduliai gaunami tada, kai radioaktyvaus skilimo metu pakinta vidinė atomų branduolių energija (žr. 18 sk.). Gama spinduliai pasižymi didele energija ir skvarba: juos galima aptikti fotografinėmis plokštelėmis ir jonizuojamaisiais detektoriais, tokiais kaip Geigerio skaitikliai.

Jonizuojančiosios spinduliuotės sukeliama žala

Dėl didelės TB spinduliuojamų fotonų energijos (apie tai kalbėsime vėliau), UV, rentgeno ir gama spinduotė gali pažeisti gyvuosius audinius. Spinduliuotė **jonizuoja** atomus ir molekules gyvose ląstelėse ir nutraukia jose vykstančius biocheminius procesus. Ląstelės gali žūti arba, dar blogiau, tapti vėžinėmis. Maži DNR pakitimai spermos ar kiaušinėlio ląstelėse yra ypač pavojingi, nes gali sukelti *genetines mutacijas*.

2 ELEKTROMAGNETINĖS BANGOS CHARAKTERISTIKOS

Elektromagnetinės bangos dažnį f ir bangos ilgį λ sieja paprastas sąryšis

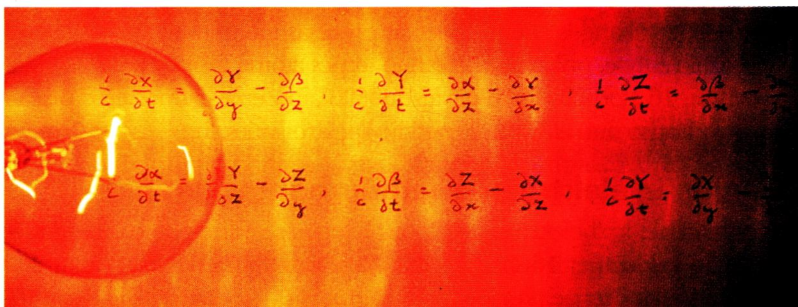
$$c = f\lambda$$

Bangos amplitudę nusako jos elektrinė ar magnetinė dedamoji – žiūrint kokios sistemos prietaisas yra naudojamas matavimams. Kaip ir visų žinomų bangų, elektromagnetinių bangų perduodama energija proporcinga amplitudės kvadratui. Kaip sužinosite 17 sk., jei spinduliuotės bangos ilgis yra artimas atomų ar molekulių matmenims, tai reikia suvokti, kad energija sklinda porcijomis, arba **kvantais**, dalelių, t. y. **fotonų** pavidalu.

Elektromagnetinių bangų greitis

1983 m. išmatavus radijo bangų ilgį, buvo nustatyta, kad elektromagnetinių bangų greitis vakuume yra vienodas visiems dažniams ir yra *tiksliai lygus* $2{,}99792458\times10^{8}$ m · s^{-1}. Šis greitis vadinamas šviesos greičiu. Tais pačiais metais ši vertė buvo patvirtinta atlikus labai kruopščiai parengtą eksperimentą, kur buvo naudojamas raudonos šviesos lazeris. Todėl dabar nėra prasmės matuoti šviesos greitį dar didesniu tikslumu (žr. 1-os d. 8 p.).

Kas nulemia elektromagnetinių bangų greitį?



16.10a) pav. **Keletas Maksvelo lygčių, užrašytų paties mokslininko ranka**

1864 m. Dž. Maksvelas (*James Clerk Maxwell*) bandė rasti greitį, kuriuo sklinda elektromagnetinę bangą sudarantys kintamieji elektrinis ir magnetinis laukai. Nagrinėdamas teoriškai jis nustatė, kad elektromagnetinės bangos greitį sąlygoja terpės, kurioje sklinda banga, elektrinės ir magnetinės savybės. Šios savybės nusakomos santykine dielektrine skvarba ε ir santykine magnetine skvarba μ (žr. 1-os d. 237 ir 268 p.).

Vakuume santykinė dielektrinė ir santykinė magnetinė skvarba lygi 1. Ore šios konstantos beveik tokios pat kaip vakuume. Maksvelui pavyko teoriškai įrodyti, kad, be šviesos, turi egzistuoti ir kitokios elektromagnetinės bangos, ir visų jų greitis gali būti apskaičiuojamas pagal lygtį:

$$c = (\varepsilon_0\mu_0)^{-\frac{1}{2}} \text{ arba } c^2\varepsilon_0\mu_0 = 1$$

Čia μ_0 yra magnetinė konstanta, kurios vertė vakuume lygi

$\mu_0 = 4\pi\times10^{-7}$ H · m^{-1} (teoriškai apibrėžta),

o ε_0 – elektrinė konstanta:

$\varepsilon_0 = 8{,}85418782(7)\times10^{-12}$ F · m^{-1} (apskaičiuota įrašius c ir μ_0 vertes).



16.10b) pav. **Škotų kilmės fizikas Dž. Maksvelas (*James Clerk Maxwell*, 1831–1879). Jis lygtimis susiejo elektrą ir magnetizmą**

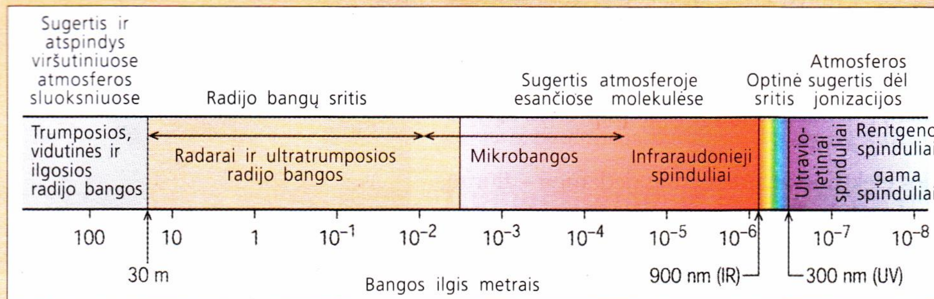
?

C Naudodamiesi Maksvelo formule patikrinkite, ar pateiktos reikšmės atitinka nurodytą c vertę.

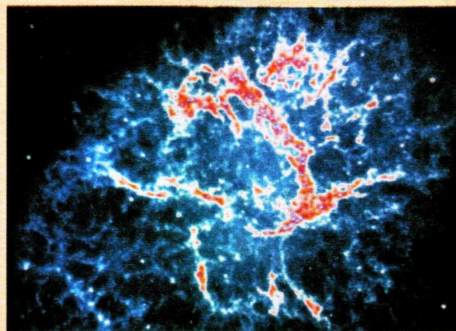
■ Žr. 2 ir 3 klausimus.

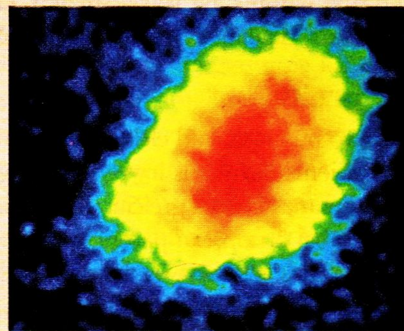
Elektromagnetinės bangos medžiagoje

Elektromagnetinių bangų greitis yra didžiausias vakuume ir mažesnis kitose medžiagose, kurios yra laidžios bangoms. Elektromagnetinės bangos paprastai negali prasiskverbti pro medžiagas, kuriose yra *laisvųjų* elektronų



16.11a) pav. **Atmosfera veikia kaip tam tikrų elektromagnetinių bangų dažnių filtras. Spinduliuotė Žemės paviršių pasiekia dviejose pagrindinėse srityse: optinėje (su šiek tiek UV ir IR) ir radijo TB. Taip pat egzistuoja keletas siaurų langų artimoje infraraudonųjų spindulių ir submilimetrinių mikrobangų srityse**





16.11b) pav. **Astronomai naudoja pro atmosferą praeinančią spinduliuotę žvaigždėms fotografuoti. Tų pačių kūnų atvaizdai priklauso nuo spinduliuotės tipo. Pavyzdžiui, kairėje pateiktas Krabo ūkas, nufotografuotas optiniu, o dešinėje – radioteleskopu**

(pvz., pro metalus), nes bangos didelę dalį energijos praranda sąveikaudamos su tokiais elektronais. Surištieji krūvininkai, tarp jų ir elektronai, taip pat gali sugerti bangos energiją, bet šis procesas intensyviau vyksta tik tam tikro dažnio srityse, priklausančiose nuo terpės atomų ar molekulių savybių. Pavyzdžiui, 16.12a) paveiksle pavaizduota, kaip Žemės atmosferos pralaidumas priklauso nuo elektromagnetinio spektro srities.

Lūžimas ir elektromagnetinių bangų greitis

Jau minėjome, kad elektromagnetinės bangos skaidrioje terpėje juda lėčiau negu vakuume. 16.12a) paveiksle pavaizduota, kas atsitinka, kai banga patenka į terpę, kurioje bangų greitis c_t. Jų dažnis išlieka pastovus, tačiau bangos ilgis sumažėja, nes

$$c_t = f \cdot \lambda_t$$

Greičio pokytis sąlygoja taip pat ir spindulių **lūžimą** – bangos frontas keičia kryptį, kai banga sklinda per dviejų terpių sandūrą kitokiu nei 90° kampu (statmenai į paviršių).

16.12b) paveiksle pavaizduotas lygiagrečių to paties dažnio bangų pluoštas, sklindantis pro vakuumo (oro) ir skaidrios terpės sandūrą. Kai pirmesnysis bangos kraštas įeina į terpę, ta dalis bangos sulėtėja, tačiau „išorėje“ esanti fronto dalis juda tuo pačiu greičiu kaip ir iki sandūros, todėl jis pasiveja pirmaujančią dalį. Terpėje atstumai tarp gretimų bangos frontų sumažėja ir bangos judėjimo kryptis pasikeičia. Šį reiškinį nusako Snelo lūžimo dėsnis.

D Garso bangos sklinda stikle greičiau nei ore. Kokia turėtų būti „garsinio lęšio" forma, kad jis galėtų sutelkti šviesos pluoštelį?

a) Banga lygiagreti aplinkos ribai

Vakuumas

Bangos greitis c

$\lambda = \frac{c}{f}$

Mažesnis bangos greitis c_t

Skaidri terpė

$\lambda_t = \frac{c_t}{f}$

b) Banga kerta aplinkos ribą kampu

c

Vakuumas

c_t

Skaidri terpė

16.12 pav. **Bangos greičio pokytis sukelia ne dažnio, o bangos ilgio pokytį, ir tai sąlygoja bangos lūžimą**

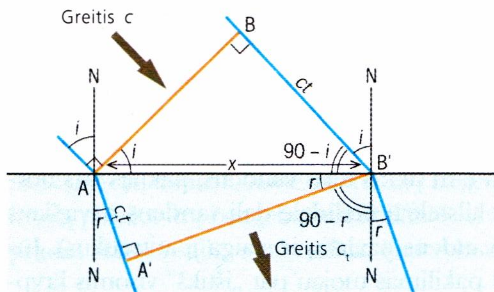
Snelo dėsnis

16.13 paveiksle pateiktoje schemoje matyti, kad priekinis bangos fronto kraštas laiko tarpą t jau nusklido terpe, kol likusioji fronto dalis pa-

siekė terpės ribą. Priekinis (kairysis) bangos frontas nukeliauja terpe atstumą $c_t t$, tuo tarpu dešinysis kraštas vakuume – ct. Pagal pateiktą schemą gauname tokį jų santykį:

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{c}{c_t} = n \text{ (pastovus dydis)}$$

Konstanta n yra **lūžio rodiklis**; ji yra *abiejų* terpių savybė, nes priklauso nuo elektromagnetinės bangos greičių abiejose terpėse. 16.1 lentelėje pateikti *šviesos* lūžio rodikliai kai kurių medžiagų ir oro sandūroje. **Absoliutaus lūžio rodiklio** vertė gaunama tuomet, kai šviesa į terpę patenka iš *vakuumo*; ši reikšmė pateikiama daugelyje žinynų.



AB yra bangos frontas: po t sekundžių jis pasiekia A'B'

Kai B pasiekia B', tai per tą patį laiką t ir A pasiekia A'

$\sin i = \frac{ct}{x}$ $\sin r = \frac{c_t t}{x}$

Lūžio rodiklis $n = \frac{c}{c_t}$

$= \frac{x \sin i}{t} \div \frac{x \sin r}{t}$

$= \frac{\sin i}{\sin r}$

16.13 pav. **Snelo lūžimo dėsnis: bangos lūžimo grafinis vaizdas ir formulės įrodymas**

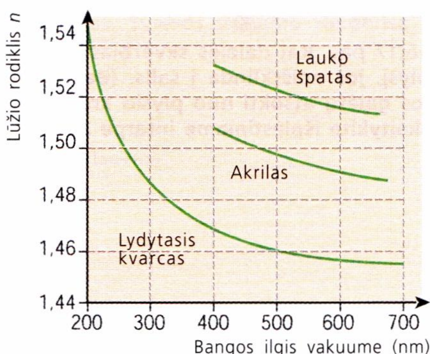
16.1 lentelė. **Šviesos lūžio oro ir medžiagos sandūroje rodikliai.**

Medžiaga	n (λ = 589 nm)
Deimantas	2,419
Lydytasis kvarcas (SiO_2)	1,458
Butelio stiklas	1,520
Borosilikatas (stiklo taurės)	1,474
Ledas	1,309
Polistirenas	1,6
Polietilenas (mažo tankio)	1,5
Akrilas	1,49
Optiniai stiklai:	
lengvasis lauko špatas	1,541
sunkusis lauko špatas	1,612
lengvasis flintstiklas	1,578
sunkusis flintstiklas	1,613
Skysčiai:	
etanolis	1,361
glicerinas	1,473
vanduo	1,333
Dujos (0 °C, 1 atm):	
oras	1,000293
anglies dioksidas	1,00045

Lūžio rodiklio priklausomybė nuo bangos ilgio

Šviesos greitis konkrečioje terpėje taip pat priklauso ir nuo bangos ilgio – skirtingų ilgių bangos lūžta skirtingais kampais. 16.14 paveiksle pateikta lydytojo kvarco, akrilo ir lauko špato lūžio rodiklių priklausomybė nuo spinduliuotės bangos ilgio vakuume nedidelėje elektromagnetinio spektro dalyje: nuo trumpųjų ultravioletinių spindulių (~200 nm) iki artimųjų infraraudonųjų spindulių (~750) srities. Lydytasis kvarcas plačiai naudojamas optiniuose prietaisuose, nes jis yra skaidrus plačiame bangų ilgių intervale.

Galima pastebėti, kad stiklo lūžio rodiklis yra didesnis trumpesnių bangų ilgių (didesnių dažnių) šviesai: t. y. trumpesnių bangų ilgių šviesa lūžta didesniais kampais. Būtent dėl to iš baltos šviesos **prizme** gautame spektre mėlyna šviesa nukrypsta daugiau negu raudona (16.2 pav.).

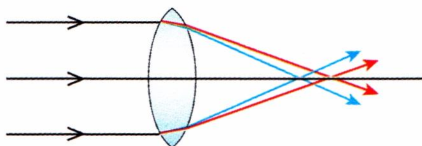


16.14 pav. **Lūžio rodiklio *n* priklausomybės nuo bangos ilgio kreivė. Dispersija vyksta dėl to, kad lūžio rodiklis priklauso nuo bangos ilgio (pagal Servėjų (*Serway*))**

Dispersija ir chromatinė aberacija

Dispersija yra labai rimta problema, kurią tenka spręsti optinių prietaisų gamintojams, naudojantiems lęšius. Dėl dispersijos glaudžiamojo lęšio suglaustos raudonos šviesos židinys susidaro toliau negu mėlynos šviesos (16.15a) pav.). Dėl to apie lęšio sudarytą vaizdą matyti spalvų spektras (16.15b) pav.). Šis reiškinys vadinamas **chromatine aberacija**. Pirmasis šią problemą teleskopuose išsprendė Niutonas (*Isaac Newton*): jis sukonstravo tokią optinę sistemą, kurioje šviesa suglaudžiama ne lęšiu, o kreivu veidrodžiu (žr. 19 sk.).

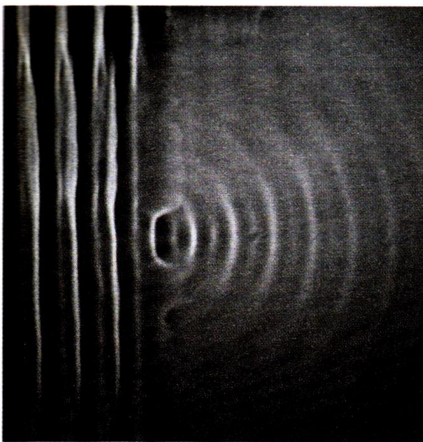
Gaminami ir **achromatiniai lęšiai** – dvigubi lęšiai iš dviejų skirtingų stiklo rūšių (pvz., lauko špato ir flintstiklo). Vienas lęšis yra glaudžiamasis, kitas, silpnesnis lęšis – sklaidomasis; jų derinys veikia kaip glaudžiamasis lęšis. Sklaidomojo lęšio lūžio rodiklis yra didesnis, todėl jis laužia spindulius stipriau ir kompensuoja pirmojo lęšio sąlygojamą dispersiją. Tokiose lęšių sistemose pavyksta beveik visiškai išvengti dispersijos įtakos atvaizdų sudarymui.



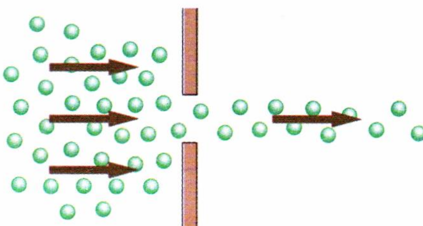
16.15a) pav. **Chromatinė aberacija vyksta dėl to, kad mėlyna šviesa pačiame lęšyje juda lėčiau negu raudona, todėl ji ir lūžta stipriau**



16.15b) pav. **Chromatinė aberacija: lęšio kraštuose matomas spalvų spektras**



16.16 pav. **Vandens bangų sklidimas pro siaurą plyšį pailgoje užtvaroje ir jų difrakcija**



16.17 pav. **Kai dalelės skverbiasi pro plyšį, jos neišsklinda į šalis. (Bet ar jos galėtų atšokti nuo plyšio kraštų? – skaitykite išplėstiniame intarpe 22 p.)**

3 BANGINIS ELEKTROMAGNETINIO SPINDULIAVIMO MODELIS

Iki šiol šiame skyriuje laikėmės nuostatos, kad elektromagnetinis spinduliavimas yra bangos. Tačiau fizikai iš tikrųjų naudoja tris šviesos modelius: tiesių spindulių modelį (žr. 19 sk.), korpuskulinį (fotonų) modelį (žr. 17 sk.) ir banginį modelį, kurį dabar nuodugniau panagrinėsime.

Bangų difrakcija

16.6 paveiksle matome kelias vandens bangas, sklindančias pro siaurą plyšį pailgoje užtvaroje. Galime pastebėti, kad praėjusios bangos išsklinda. Šis išsklidimas vadinamas **difrakcija**, ir tai yra pagrindinis požymis, kuriuo *bangų* elgesys skiriasi nuo *dalelių* elgesio.

Kaip bangos juda į priekį

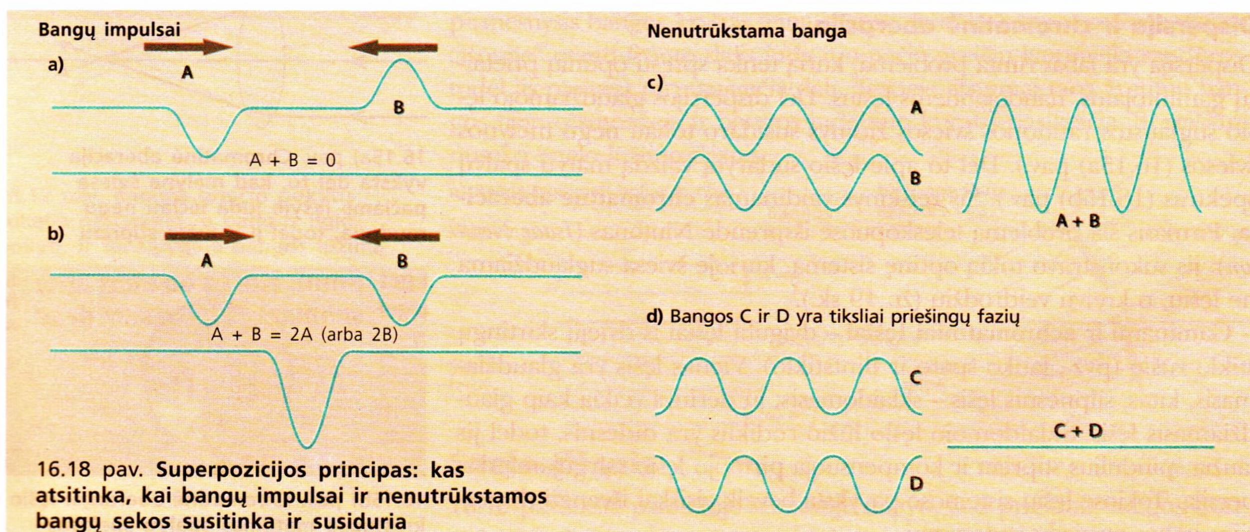
Pavienės bangos ketera (16.16 pav.) juda į priekį nekeisdama krypties. Vandens bangos keteroje yra tam tikras tūris vandens, pakilęs virš normalaus lygio. Įsivaizduokite kilstelėtą nedidelę dalį vandens paviršiaus (pavyzdžiui, pirštu palietus vandens paviršių ir staiga jį atitraukus). Jūs tikėsitės ir būsite teisūs, kad pakilimas tuojau pat „ištikš“ visomis kryptimis. Vandens paviršius toje vietoje pradės svyruoti aukštyn žemyn, ir apskritiminiai impulsai pasklis į šalis nuo pradinio trikdžio.

Kodėl kilstelėto vandens žiedas (apskritiminė ketera) sklinda į šalis nekeisdamas krypties? Norint į tai atsakyti – ir tiksliai paaiškinti difrakcijos reiškinį – tenka remtis bangų **superpozicija**, kurią pirmasis sugalvojo Ch. Heigensas (*Jan Christian Huygens*, Olandija, 1629–1695), stengdamasis pagrįsti savo teoriją, kad šviesa iš tikrųjų yra bangos.

Heigenso principas

Superpozicijos principas

Kai dvi vandens bangos susitinka, jos praeina viena pro kitą nesąveikaudamos. Tačiau pasiekusios tuos pačius taškus bangų amplitudės susideda: dvi keteros sukuria didesnę keterą ir lygiai taip pat dvi įdubos sudaro didesnį įdubimą. Jei ketera susiduria su to paties dydžio įduba, tai toje vietoje vandens paviršius tampa visiškai plokščias. Išnagrinėkite 16.18a–d) paveikslus, kurie iliustruoja **superpozicijos principą**, kai dvi



16.18 pav. **Superpozicijos principas: kas atsitinka, kai bangų impulsai ir nenutrūkstamos bangų sekos susitinka ir susiduria**

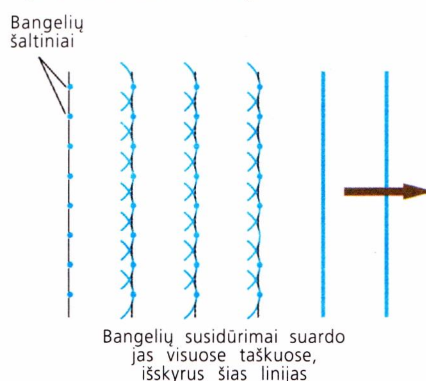
vienodos bangos paprasčiausiai susideda. (Palyginkite su mechaninių bangų superpozicija 1-os d. 134 p.)

Heigensas panaudojo šį principą norėdamas paaiškinti, kaip sklinda *šviesos* bangos. Vandens bangos ketera yra apskritiminių bangų šaltinis, taigi ji sukuria daugybę taškinių („ištykštančių") apskritiminių bangų. Heigensas įsivaizdavo, kad analogiškai ir kiekvienas tiesaus šviesos bangos fronto taškas yra kitos bangos šaltinis.

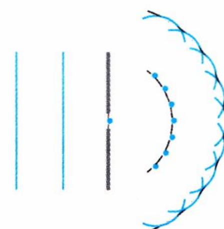
Tačiau bangos (ar bangelės) iš kiekvieno tokio taškinio šaltinio **susikerta** su iš kitų taškų sklindančiomis bangelėmis. Vienintelė padėtis, kur tos bangelės pagal superpozicijos principą susideda viena su kita, yra pradiniam frontui lygiagrečioje linijoje. Taip bangelių superpozicija suformuoja naują, tiesų frontą. Tai reiškia, kad plokščia (tiesaus fronto) banga juda į priekį kaip plokščia banga ir dėl to *šviesa sklinda tiesiomis linijomis*. (16.19a) pav.).

Dabar prisiminkime siaurą plyšį. Jame tilps tik baigtinis skaičius bangos fronto taškų. Vadinasi, pro plyšį praėjusios bangos fronto nedarys tie taškiniai bangelių šaltiniai, kurie atsitrenks į barjerą. Kraštuose pritrūks plokščią frontą palaikančių bangelių, atsklindančių iš šono. Dėl to už plyšio bangos pradės sklisti į šalis, o tai reiškia, kad vyks *difrakcija* (16.19b) pav.).

a) Kiekvienas bangos fronto taškas sukuria „antrines bangeles". Kad būtų aiškiau, pateikta tik keletas taškų ir bangelių. Kai plokščios bangos frontas labai ilgas, tai visų antrinių bangelių suma vėl sukuria plokščiąją bangą, t. y. šviesa sklinda tiesia linija.



b) Kai banga praeina pro siaurą plyšelį, ji išplinta: tai **difrakcija**



16.19 pav. **Šviesos sklidimo Heigenso modelis**

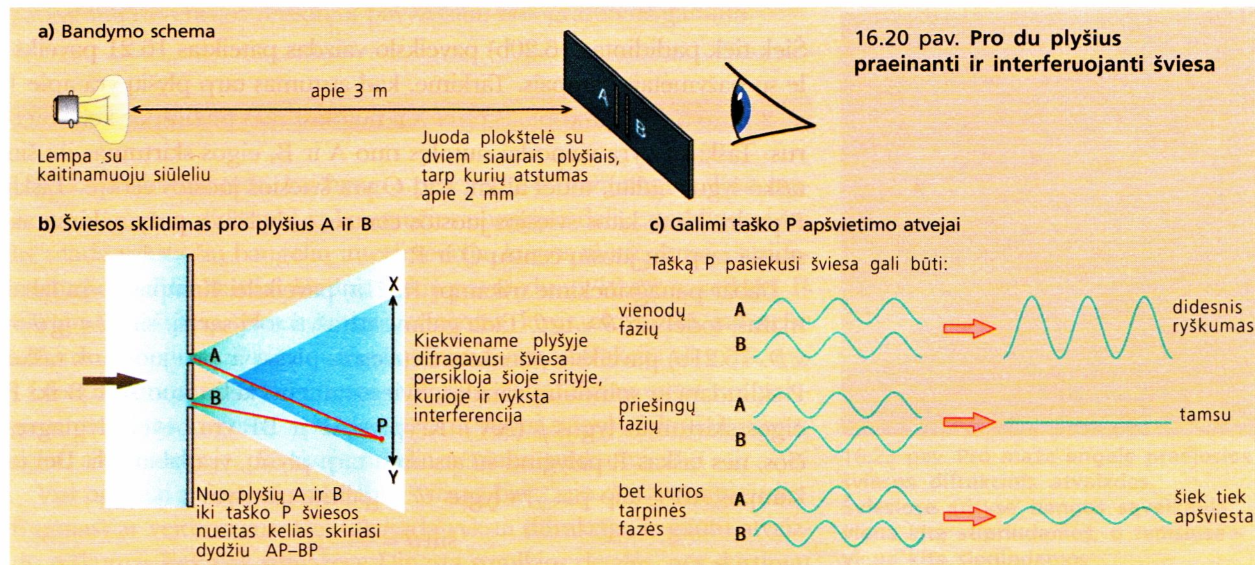
4 INTERFERENCIJA IR BANGOS ILGIS

Jungo (Young) dviejų plyšių bandymas

16.20a) pav. pavaizduotas lygiagretus šviesos pluoštelis (gaunamas, pavyzdžiui, padidinus atstumą iki šviesos šaltinio), kuris apšviečia nepermatomą ekraną su dviem siaurais plyšiais. Šviesa už tų plyšių difraguoja, o išplitę pluošteliai persikloja. Matyti, kad bet kurį tašką, esantį atkarpoje X–Y, apšviečia šviesa, praėjusi pro abu plyšius A ir B (16.20b) pav.). Kuriame nors taške, pavyzdžiui P, šviesa gali atsklisti tos pačios fazės arba **skirtingų fazių**, kaip pavaizduota 16.20c) paveiksle. Dėl to suminis šviesos intensyvumas X–Y atkarpoje, priklausomai nuo taško P padėties, gali kisti nuo nulio iki dvigubai stipresnio šviesos srauto nei už vieno kurio plyšio.

■ Žr. 4 klausimą.

Tašką P pasiekusių bangų fazės priklauso nuo A, B ir C taškų padėties, o jeigu visai tiksliai – nuo šviesos nueitų kelių ilgių *skirtumo* AP–BP (16.21b) pav.). Šis dydis optikoje paprastai vadinamas *eigos skirtumu*.



16.20 pav. **Pro du plyšius praeinanti ir interferuojanti šviesa**

?

E a) Kodėl kasdieniniame gyvenime taip retai pastebime šviesos interferenciją?

b) Įsivaizduokime, kad žmogaus akys ištobulėjo ir gali registruoti ne tik regimojo, bet ir kitų elektromagnetinio spektro sričių spinduliuotes. Tarkime, automobilio šviesos ant kelio sukuria interferencinį raštą kurioje nors elektromagnetinio spektro srityje, kur mes gerai matome. Įvertinkite šios „šviesos" bangos ilgį.

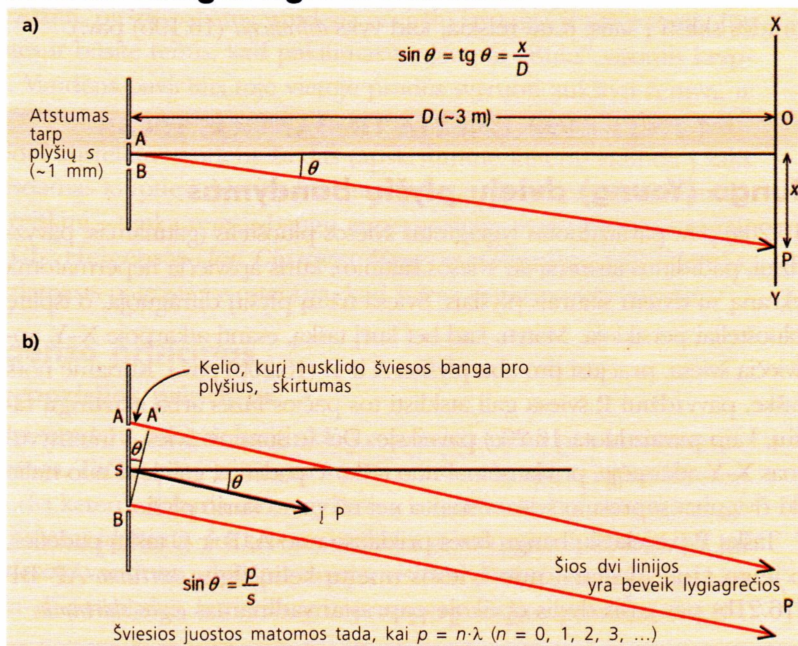
?

F Poros plyšių (taip pat ir difrakcinės gardelės) sukurtas raštas sudarytas iš šviesių sričių, atskirtų tamsiomis sritimis. Tamsias sritis sudaro priešingų fazių šviesos bangos (jos perneša ir energiją) – susidurdamos jos nuslopina viena kitą. Ar šis reiškinys neprieštarauja energijos tvermės dėsniui? Kadangi šis dėsnis negali būti pažeistas, paaiškinkite, kas galėjo atsitikti su „išnykusia" energija.

- Jeigu AP–BP lygus nuliui, vienam pilnam bangos ilgiui arba sveikajam skaičiui bangos ilgių, tai abiejų A ir B šaltinių šviesos bangos taške P yra tos pačios fazės, todėl tame taške šviesos intensyvumas padidėja.
- Jeigu AP–BP lygus pusei bangos ilgio arba nelyginiam skaičiui pusbangių, tai A ir B šaltinių išspinduliuotos šviesos bangos taške P yra tiksliai priešingų fazių, ir dėl interferencijos šiuo atveju ekranas tame taške esti visiškai neapšviestas, bangos viena kitą slopina.

Nesunku įsivaizduoti, kad taškui P slenkant išilgai XY atkarpos (16.20b) pav.) eigos skirtumas kinta, todėl taškas P atsiduria tai apšviestoje, tai tamsioje srityje. Tos sritys vadinamos **interferencinėmis juostomis**. Šios juostos lengvai pastebimos žiūrint pro du, per milimetrą vienas nuo kito nutolusius siaurus plyšius, kaip pavaizduota 16.20a), į toli, sakykime, už 3 m, įtaisytą šviesos šaltinį. Tai ir yra garsusis **Jungo dviejų plyšių bandymas**, bene pirmasis eksperimentas, privertęs fizikus sutikti su teiginiu, jog šviesa yra bangos. Be to, šis eksperimentas buvo panaudotas šviesos šaltinio spinduliuotės bangos ilgiui nustatyti.

Šviesos bangos ilgio matavimas



16.21 pav. **Jungo bandymas. Skirtingi keliai, kuriuos nusklinda pro du plyšius spinduliuojama šviesa, paaiškina interferencinių juostų atsiradimą**

Šiek tiek padidintas 16.20b) paveikslo vaizdas pateiktas 16.21 paveiksle su pažymėtais kampais. Tarkime, kad atstumas tarp plyšių yra apie 1 ar 2 mm, o stebėjimo plokštuma XY nutolusi nuo plyšių per kelis metrus. Taškas O yra vienodai nutolęs nuo A ir B, eigos skirtumas iki šio taško lygus nuliui, todėl aišku, kad O yra šviesios juostos centre. Tašką P pasirinkime kitos šviesios juostos centre, o dydžiu x pažymėkime atstumą tarp šių juostų centrų O ir P.

Dabar panagrinėkime trikampį 16.21a) paveiksle. Kampas θ yra labai mažas, todėl $\sin\theta \approx \operatorname{tg}\theta$. Tada galime užrašyti tokį sąryšį: $\sin\theta \approx \operatorname{tg}\theta = x/D$. 16.21b) paveiksle pateiktas detalesnis plyšių ir pro juos link taško P sklindančių spindulių vaizdas. Šviesos nueito kelio nuo A ir B iki P eigos skirtumas lygus p (AA'). Kryptys AP ir BP yra beveik lygiagrečios, nes taškas P, palyginti su atstumu tarp plyšių, yra labai toli. Dėl to kampas ABA' taip pat yra lygus θ, ir galime užrašyti:

$$\sin\theta = \frac{p}{s}$$

Šviesios juostos gaunamos tuomet, kai eigos skirtumas yra $p = n\lambda$. Sulyginę abi $\sin\theta$ išraiškas, gauname:

$$\frac{x}{D} = \frac{n\lambda}{s} \text{ arba } x = \frac{n\lambda D}{s}$$

Šviesios juostos yra nutolusios viena nuo kitos atstumu Dx, kuris atitinka eigos skirtumą, lygų bangos ilgiui, t. y. juostos nutolusios

$$\Delta x = \frac{\lambda D}{s}$$

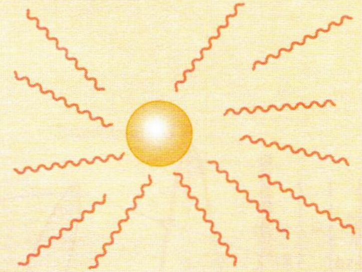
Juostų išsidėstymas, gautas pagal 16.20b) paveiksle pateiktą schemą, paprastai stebimas pro mikroskopo okuliarą, ant kurio yra mikrometrinė skalė, arba matuojamas slankiuoju mikroskopu, užmautu ant mikrometro ašies. Atstumas tarp juostų nustatomas taip: norint gauti kuo tikslesnį rezultatą suskaičiuojama, kiek iš viso yra matomų juostų, tada išmatuojamas nuotolis tarp pirmos ir paskutinės matomos juostos (dydis x 16.21b) pav.) ir randamas šių dydžių santykis.

D galima išmatuoti metaline matavimo juosta, nuotolį tarp plyšių s – naudojantis tuo pačiu slankiuoju mikroskopu ar kitokiu optiniu metodu, galinčiu matuoti mažus atstumus. (Reikia pastebėti, kad galutinio rezultato tikslumas labiausiai priklauso nuo pastarojo matavimo tikslumo.) Tuomet naudojantis paskutine formule galima rasti ir naudojamo šaltinio spinduliuojamos šviesos bangos ilgį.

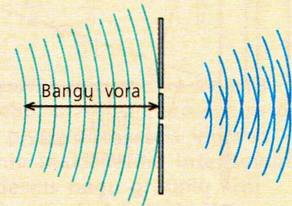
Koherentiškumas

Interferencijos reiškinio nepastebėtume, jei eigos skirtumas tarp sąveikaujančių bangelių būtų didesnis nei 30 cm. Nematytume interferencinių vaizdų ir tada, jei bangelių šaltiniai būtų *skirtingi*, pavyzdžiui, dvi lempos arba dvi žvaigždės. Taip yra dėl to, kad šviesos šaltiniai bangas išspinduliuoja atsitiktinai, trumpais blykstelėjimais, kaip pavaizduota 16.22a) paveiksle. Interferencija vyksta ir tada, tačiau kiekvieną akimirką vis kitoje erdvės dalyje ir tokį trumpą laiko tarpą (apie 10^{-8} s), kad jos neįmanoma pastebėti. Praktiškai interferenciją galima stebėti tik tada, kai bandymui naudojami šviesos pluošteliai iš tų pačių „blykstelėjimų". Tokia šviesa yra vadinama **koherentine** (16.22b) pav.). Patys geriausi koherentinės šviesos šaltiniai yra **lazeriai**. Lazeriai gali spinduliuoti koherentinę šviesą, kuri itin sėkmingai pritaikoma ten, kur naudojamasi interferencijos reiškiniu, pavyzdžiui, hologramoms gaminti.

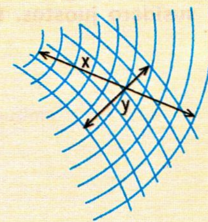
a) Šviečiantys kūnai šviesą spinduliuoja atsitiktine seka, kelių dešimčių centimetrų ilgio bangų voromis



b) Koherentinė interferencija. Du plyšiai kuria koherentines bangas, nes juos apšviečia tas pats taškinis šaltinis, tačiau eigos skirtumas nėra labai didelis



c) Nekoherentinė interferencija. Erdvėje suartėjusių skirtingų bangų grandinės taip pat sąveikauja, tačiau bangų fazės yra atsitiktinės, todėl jų interferencijos vaizdas trunka per trumpai (10^{-8} s), kad galėtų būti pastebimas



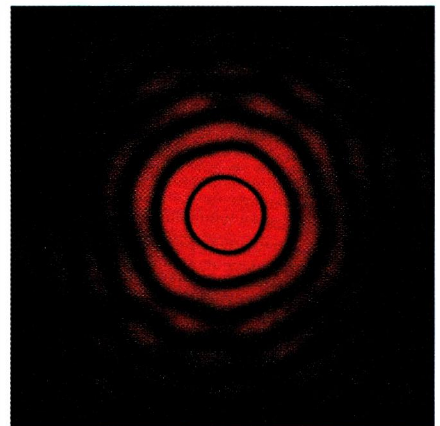
16.22 pav. **Atsitiktinė šviesos emisija, koherentiškumas ir nekoherentiškumas**

■ Žr. 5, 6 ir 7 klausimus.

5 DIFRAKCIJA IR ATVAIZDO SUDARYMAS

Difrakcija stebima tada, kai bangos praeina pro mažą angelę. Kuo mažesnė anga, tuo didesnė į ją krintančios energijos dalis „pasklinda į šalis"; tada vyksta šių bangelių interferencija, kurios metu ekrane susidaro būdingi **difrakciniai žiedai**, kokie pavaizduoti 16.23 paveiksle. Iš tikrųjų tai taškinio šviesos šaltinio atvaizdas, kuris, akivaizdu, jau nebe taškinis, o žiedinis. Didėjant angos matmenims, difrakcija silpnėja, nes į šalis pasklinda mažesnė šviesos energijos dalis. Tačiau esant net palyginti didelėms angoms, ypač kai tiriami silpni šviesos šaltiniai, pavyzdžiui, astronomijoje, difrakcija sukelia nemažai sunkumų.

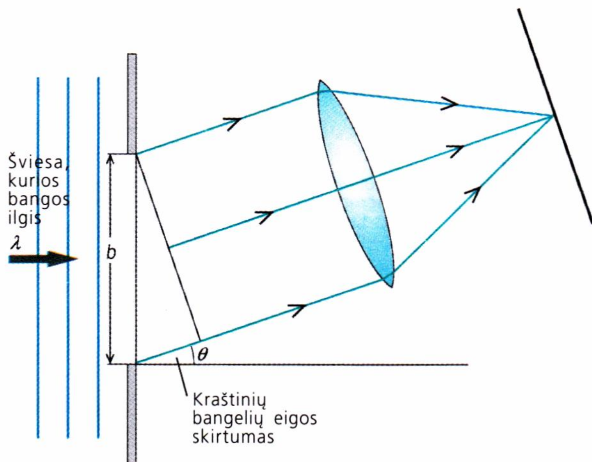
Visi optiniai prietaisai nukreipia šviesą į baigtinio dydžio angas (diafragmas) ar veidrodžius. Dėl to visada vyksta difrakcija, ir gautų atvaizdų ryškumas šiek tiek sumažėja. Dingsta smulkios detalės, nes skirtingų



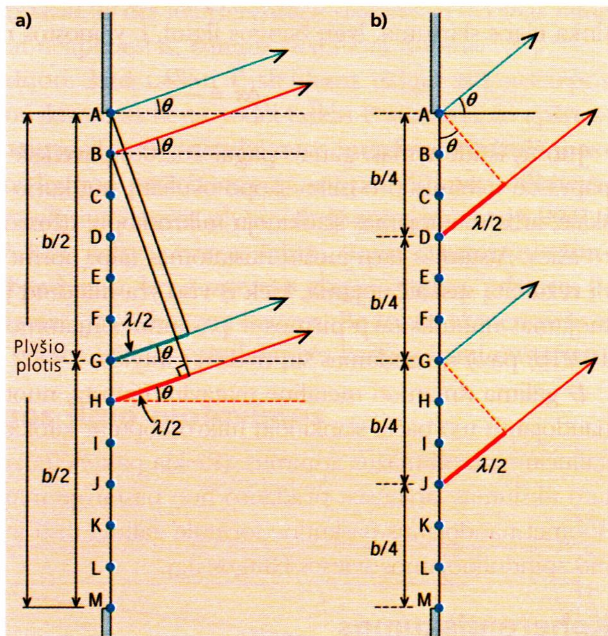
16.23 pav. **Pro mažą angelę praėjusios šviesos difrakcinis atvaizdas. Šviesiose srityse bangos sąveikauja viena kitą stiprindamos, o tamsiose – viena kitą slopindamos**

objekto taškų šviesa atvaizdą pasiekia kaip *persiklojantys difrakciniai jų atvaizdai*. Difrakcija iškreipia netgi teleskopais gaunamus vaizdus, ir tai viena iš priežasčių, dėl ko teleskopai daromi tokie dideli (žr. 20 p.).

Difrakcija už vieno plyšio



16.24 pav. **Difrakcija už siauro plyšio. Šviesa difraguoja įvairiais kampais θ. Kai šviesa surenkama į lęšio židinį, vyksta interferencija**



16.25 pav. **Difrakcijos geometrinė interpretacija: taip susidaro juostos. Paaiškinimai pateikti tekste**

Nors dauguma optinių prietaisų turi apskritas diafragmas, tačiau, kad būtų paprasčiau nustatyti pagrindinius dėsningumus, naudosime stačiakampes angas, o gautus rezultatus pritaikysime apskritoms angoms. 16.24 paveiksle pavaizduota, kaip iš tolimo šaltinio atsklidusi šviesa, kurios bangos ilgis λ, praeina pro siaurą, *b* pločio angą. Grįžkime prie 16.19 paveikslo: remdamiesi Heigenso principu šiame pavyzdyje taip pat galime įsivaizduoti bangos frontą, užpildantį visą angą. Pagal šį principą kiekvienas taškas tampa antriniu bangų šaltiniu, skleidžiančiu bangeles visomis kryptimis. Panagrinėkime bangelių šviesą, kuri sklinda nukrypusi nuo pradinės krypties kampu *θ*. Ši šviesa sudaryta iš daugelio taškų skleidžiamų bangelių, tų taškų – antrinių šaltinių – skaičių galime pasirinkti kokį tik norime. Ir pagaliau šią šviesą lęšiu surenkame į jo židinį. Kad galėtume stebėti šios optinės sistemos sudaromą vaizdą, židinio plokštumoje pastatome ekraną.

16.25a) paveiksle matyti, kad šviesa turi nusklisti nuo angos taško G iki židinio didesnį atstumą negu šviesa, išspinduliuota iš taškų A, B,..., F (panašiai bus ir taškams H, I,..., M). Visų nuo angos atsklidusių antrinių bangų sudarytas atvaizdas lęšio židinyje bus ne kas kita, kaip angos taškų skleidžiamų bangelių interferencijos rezultatas. Jau žinome, kad šį rezultatą lemia bangelių eigos skirtumas, arba jų fazės. Iš pradžių aptarsime, kokiam kampui *θ* esant nematysime ekrane jokios šviesos.

Grįžkime prie 16.25a) paveikslo. Nagrinėjama anga, kurios plotis *b*, padalyta į dvi lygias dalis. Viršutinėje dalyje pažymėti keli taškiniai šaltiniai nuo A iki G; jų skaičių, suprantama, galima pasirinkti bet kokį. Apatinėje dalyje yra tiek pat taškinių šaltinių, pažymėtų raidėmis nuo H iki M. Kampas *θ* yra toks, kad iš A ir G išspinduliuotų bangelių eigos skirtumas lygus tiksliai pusei bangos ilgio. Panašiai taškų B ir H spinduliuojamos šviesos eigos skirtumas lygus vienam pusbangiui, taip pat taškų C ir I ir t. t. Toks eigos skirtumas rodo, kad kiekvienos poros bangelės yra

priešingų fazių, todėl sąveikaudamos jos viena kitą *slopina*. Net ir pasirinkę be galo didelį taškinių šaltinių skaičių, juos vis tiek galėtume suskirstyti poromis, kurių spinduliuotės išilgai krypties, apibrėžtos kampu θ, slopintų viena kitą. Tai reiškia, kad kampu θ nematysime jokios šviesos, t. y. šia kryptimi matomas pirmos eilės difrakcijos minimumas. Kampą θ galima rasti iš 16.25a) pavaizduoto trikampio:

$$\sin\theta = \frac{\lambda/2}{b/2} = \frac{\lambda}{b}$$

Visai panašiai galima parinkti ir kitas poras taškinių šaltinių, kad jų išspinduliuotos bangelės silpnintų viena kitą. Kaip matyti iš 16.25b) paveikslo, dabar kampas θ šiek tiek didesnis. Šiuo atveju anga padalyta į keturias lygias dalis. Nesunku suprasti, kad A ir D taškų išspinduliuotos bangelės sąveikaudamos viena kitą slopina, nes jų eigos skirtumas lygus pusei bangos ilgio, t. y. jų fazės priešingos. Tokiu pat būdu taško B skleidžiamą šviesą jungiame su E, o C su F. Bangas slopinančia sąveika pasižymės taškų poros G ir J, H ir K, I ir L apatinėje angos dalyje. Taigi šviesos nematysime ir šia kryptimi (kampu θ). Iš 16.25b) paveiksle pateikto trikampio gauname:

$$\sin\theta = \frac{\lambda/2}{b/4} = \frac{2\lambda}{b}$$

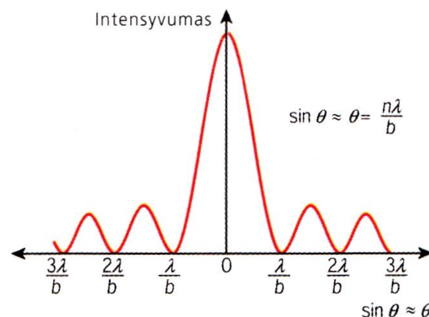
Panašiai nagrinėdami toliau galėtume rasti ir kitus kampus, kuriais šviesa yra nematoma: reiktų išnagrinėti angą, padalytą į šešias, aštuonias, dešimt ir t. t. dalių. Tačiau jau ir dabar galima pastebėti, kad šviesos, praėjusios pro stačiakampę angą, difrakcijos minimumai gaunami tokiais kampais:

$$\sin\theta = \frac{n\lambda}{b}$$

kur n yra porų skaičius. Paprastai ši lygtis pateikiama kitokiu pavidalu:

$$b\sin\theta = n\lambda$$

Difrakcinio atvaizdo nuo stačiakampės angos intensyvumo priklausomybė nuo $\sin\theta$ pateikta 16.26 pav. Šviesos intensyvumas **centriniame maksimume** yra didžiausias. Dydis n dar vadinamas **difrakcijos maksimumo eile**. Taigi centrinis difrakcijos maksimumas yra **nulinės eilės**



16.26 pav. **Lygiagretaus šviesos pluoštelio, praėjusio pro siaurą *b* pločio plyšį, difrakcinis vaizdas. Centrinio maksimumo intensyvumas yra didesnis negu gretimų kitų**

■ Žr. 8 klausimą.

PAVYZDŽIAI

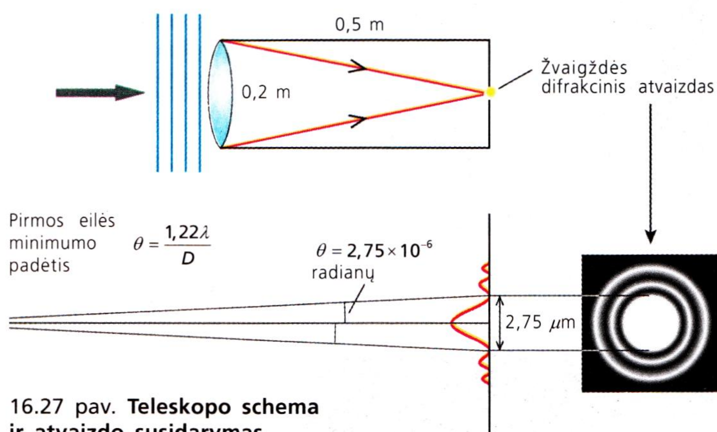
K a) Koks yra mėlynoje 450 nm bangų ilgio šviesoje nufotografuotos žvaigždės atvaizdo centrinio maksimumo kampinis plotis? Vaizdas gautas teleskopu, kurio optinės sistemos apskritos diafragmos skersmuo 0,2 m.

b) Atvaizdas sudaromas 0,5 m atstumu nuo pirminio glaudžiamojo lęšio. Koks yra centrinio maksimumo dydis fotografinėje plokštelėje?

A

a) Pasinaudoję difrakcijos formule apskritiminei angai gauname:

$$\sin\theta = \frac{1,22\lambda}{D} = \frac{1,22\times450\times10^{-9}}{0,2} = 2,75\times10^{-6}$$



16.27 pav. **Teleskopo schema ir atvaizdo susidarymas**

Šis kampas yra labai mažas $\theta = 2,75 \times 10^{-6}$ rad. Gauto atvaizdo centrinio maksimumo kampinis plotis 2θ lygus $5,5 \times 10^{-6}$ rad.

b) Pagal kampą, apskaičiuotą klausimo **a)** dalyje, randame centrinio maksimumo plotį:

$$0,5 \times 5,5 \times 10^{-6}\ \text{m} = 2,75 \times 10^{-6}\ \text{m}\ (2,75\ \mu\text{m})$$

maksimumas, nes šio maksimumo smailė atitinka atvejį, kai $n = 0$, t. y. visų taškinių šaltinių porų išspinduliuotų bangelių eigos skirtumas yra lygus nuliui. **Difrakcijos maksimumo pločiu** vadinamas atstumas tarp dviejų jam artimiausių difrakcijos minimumų. Nulinės eilės centrinio maksimumo plotis yra lygus 2θ, ir tai yra atstumas tarp pirmosios eilės $n = 1$ minimumų.

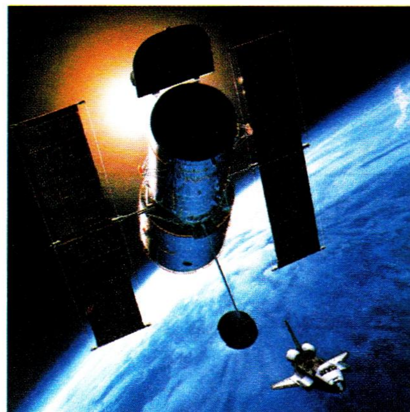
Difrakcija už apskritos angos

Vaizdas už apskritos angos yra gerokai sudėtingesnis nei už stačiakampės, tačiau centrinio difrakcijos maksimumo kampinis plotis išreiškiamas labai panašia formule:

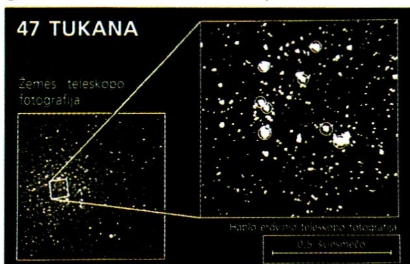
$$\sin\theta = \frac{1{,}22\lambda}{D},$$ kur D yra angos *skersmuo*.

Pavyzdžio paaiškinimai

Žvaigždės yra taip toli, kad kiekviena jų iš tikrųjų yra taškinis šviesos šaltinis. Tuo tarpu fotografinėje plokštelėje ar kitoje stebėjimo priemonėje gauname jos difrakcinį atvaizdą su būdingais tamsiais ir šviesiais žiedais. Jei astronomai nori tyrinėti žvaigždę, jie turi įstengti atskirti jos difrakcinį atvaizdą fotografijoje nuo artimiausių kaimynių difrakcinių žiedų sistemų, kurios matomos 16.28b) paveiksle. Dėl to, norint gauti kuo geresnę *skyrą*, difrakciniai atvaizdai turi būti kiek įmanoma mažesni. Vadinasi, prietaisą reikia sukonstruoti taip, kad parametras b būtų kuo didesnis, t. y. astronomai stebėjimams naudoja kiek galima didesnį teleskopą. Be to, trumpesnių bangos ilgių šviesos sudarytas difrakcinis atvaizdas yra mažesnis. Dėl to praktikoje stengiamasi naudoti mėlyną šviesą. Daugiau mažinti bangos ilgio negalima, nes dar trumpesnes UV bangas smarkiai sugeria Žemės atmosfera. Paties didžiausio optinio teleskopo (Mauna Kea observatorijoje Havajuose, 19.38 pav.) skersmuo yra 9,82 m. Radioteleskopuose naudojami daug didesni bangų ilgiai.



16.28a) pav. **Hablo (*Hubble*) erdvinis teleskopas: juo galima nufotografuoti 50 kartų silpnesnius ir 7 kartus toliau esančius dangaus kūnus nei geriausiais Žemės teleskopais**



PAVYZDŽIAI

Hablo erdvinis teleskopas

K Hablo erdvinio teleskopo veidrodžio diafragmos skersmuo 2,4 m.

a) Kokia yra teorinė šio teleskopo skiriamoji geba, jei jis veikia žalios šviesos, kurios bangos ilgis $5{,}2 \times 10^{-7}$ m, srityje?

b) Mažiausias atstumas tarp Žemės ir Marso yra $7{,}83 \times 10^{10}$ m. Kokiu mažiausiu atstumu gali būti du nedideli objektai Marso paviršiuje, kad juos būtų galima aptikti Hablo teleskopu?

A

a) Pagal skiriamosios gebos formulę $\theta = 1{,}22\lambda / D = \dfrac{1{,}22 \times 5{,}20 \times 10^{-7}}{2{,}40}$

gauname $\theta = 2{,}66 \times 10^{-7}$ radianų.

b) Tegul tarp objektų Marso paviršiuje yra x metrų. Kampas, kuriuo bus matomi šie objektai pro teleskopą, turi būti lygus arba didesnis už ribinę skiriamąją gebą θ. Tuo būdu ribiniam atvejui galime užrašyti

$$\frac{x}{7{,}83 \times 10^{10}} \geq 2{,}64 \times 10^{-7}$$

ir gauname $x \geq 20697\,\text{m}$, arba $20{,}7\,\text{km}$.

16.28b) pav. **Žvaigždėtojo dangaus fotografijų, gautų Žemėje įrengtu teleskopu (mažesnysis paveikslėlis) ir Hablo teleskopu, palyginimas. Hablo teleskopas pasižymi daug geresne skyra, todėl juo galima aptikti naujas žvaigždes**

Palyginkime tipinius bangų ilgius 6 cm radioteleskopams ir 6×10^{-7} cm optiniams teleskopams. Norint radioteleskopu gauti tokios pat skyros atvaizdus, jis turi būti 10 milijonų kartų didesnis už optinį teleskopą!

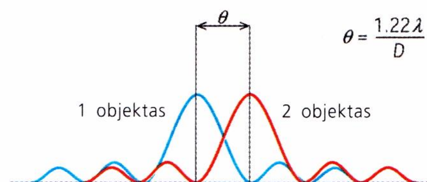
Skiriamoji geba: Reilėjaus (*Rayleigh*) principas

Skiriamoji geba (skyra) yra dydis, apibūdinantis optinės sistemos gebėjimą išskirti atvaizdo detales, pavyzdžiui, viena arti kitos esančias dvi žvaigždes, du objektus gyvoje ląstelėje ir pan. Bet kokios vaizdą kuriančios sistemos skiriamąją gebą galima nusakyti Reilėjaus principu (Lordo *Rayleigh*, Britanija, 1842–1919, garbei), kuriuo remiantis dviejų taškinių objektų atvaizdus galima išskirti tada, kai vieno jų centrinis maksimumas yra kito taško atvaizdo pirmame difrakciniame minimume. Tai iliustruojama 16.29 paveiksle, kuriame matyti, kad tuo atveju, kai šis Reilėjaus principas išlaikytas, centrinius dviejų taškinių objektų maksimumus skiria kampas θ, apskaičiuojamas pagal tokį sąryšį:

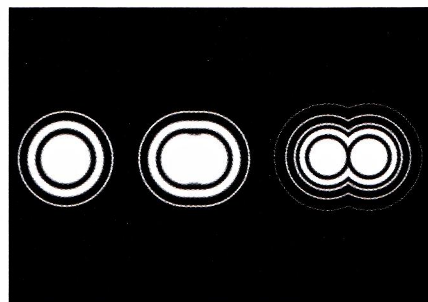
$$\sin\theta = \frac{1,22\lambda}{D}$$

Daugelyje optinių prietaisų šis kampas yra toks mažas, kad Reilėjaus lygtis paprastai užrašoma taip:

$$\theta = \frac{1,22\lambda}{D}, \text{ kur } \theta \text{ matuojamas radianais.}$$



16.29a) pav. **Dviejų taškinių šviesos šaltinių intesyvumų diagrama, kurioje centriniai maksimumai atskirti kampu** θ



16.29b) pav. **Reilėjaus kriterijaus iliustracija: taškinių šaltinių difrakciniai atvaizdai. Kairėje – vienas šaltinis; viduryje – du neišskirti šaltiniai; dešinėje – du visiškai išskirti šaltiniai**

6 DIFRAKCINĖ GARDELĖ IR SPEKTRAS

Elektromagnetinio spektro tyrimai regimajame ir jam artimame diapazonuose įgalino padaryti vienus iš svarbiausių mokslo atradimų. Helio vardu buvo pavadintas pirmasis Saulės spektre aptiktas elementas dar iki buvo atrasta dujinė helio forma Žemėje. Dėl to šis elementas ir buvo pavadintas pagal graikišką Saulės vardą (*Helio*).

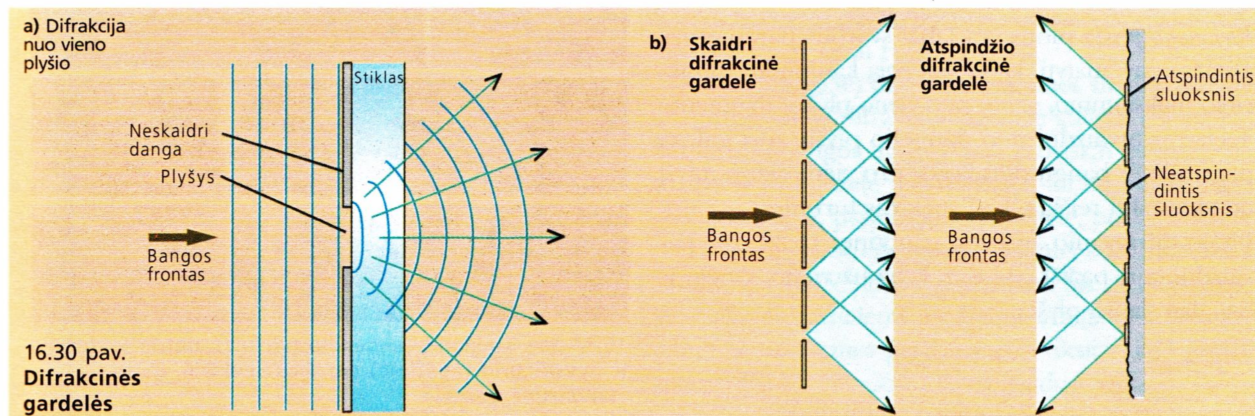
Spektrams gauti iš pradžių buvo naudojamos stiklinės prizmės, tačiau stiklas sugeria ultravioletinius ir dalį infraraudonųjų spindulių. Mikrobangų ir radijo bangų tyrimams prizmės yra visiškai netinkamos.

Modernioji spektroskopija daugiausia grindžiama **difrakcinės gardelės** naudojimu. Difrakcinė gardelė yra stiklinė arba metalinė plokštelė, kurios paviršiuje įrėžta labai daug plonyčių lygiagrečių linijų. Šios linijos išsklaido spindulių pluoštą tokiu būdu, kad sukuria kelias serijas spektrų (tai aptarsime vėliau). Jei gardelės linijos yra pakankamai arti viena kitos, tai gautas spektras išsiskleidžia daug platesniu kampu nei prizmės (16.30a) pav.). Dėl to tokiame spektre galima stebėti daugiau smulkių detalių. Pirmąją gardelę 1882 m. pagamino amerikietis H. Roulandas (*Henry Rowland*), išraižęs linijas būtinu tikslumu ir reikiamu atstumu viena nuo kitos.

?

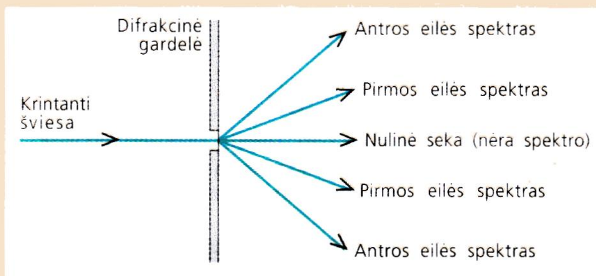
G Žmogaus akis gana gerai skiria vaizdus, kuriuos sukuria 500 nm bangos ilgio šviesa. Įvertinkite, kiek kartų žmogaus akys turėtų būti didesnės, kad jo akys pasižymėtų tokia pat skiriamąja geba superaukštų televizijos dažnių diapazone (bangos ilgis ~1 m)?

H Du radioteleskopai sujungiami vienai radijo dažnių diapazone aktyviai spinduliuojančiai žvaigždei stebėti. Teleskopai yra skirtinguose žemynuose, juos skiria 4000 km. Jie suderinti 21 cm bangos ilgiui. Kokia yra šios sistemos kampinė skyra (skiriamoji geba)?



16.30 pav. **Difrakcinės gardelės**

Difrakcinė gardelė



16.31 pav. **Difrakcine gardele gaunami keli spektrai**

Difrakcinės gardelės veikimo principas panašus į difrakcinio atvaizdo už vieno siauro plyšio susidarymą (tai jau aptarėme 18 p.). Tik gardelės atveju reikia nagrinėti daug plyšių. Plyšių plotį, kaip ir anksčiau, žymėkime raide b, neskaidrių tarpų plotį a. Dydis $d = a + b$ vadinamas **difrakcinės gardelės periodu**. 16.31 pav. pavaizduota, kas atsitinka, kai lygiagretus šviesos pluoštelis (pvz., iš tolimo šviesos šaltinio) praeina pro vieną difrakcinės gardelės plyšį.

Difragavusi šviesa sklinda nuo kiekvieno plyšio sferinių bangų pavidalu, kaip pavaizduota 16.30a) pav. Plyšeliai yra atstumu d vienas nuo kito, todėl šviesa nuo kiekvieno sekančio plyšelio turi nukeliauti papildomą atstumą. Duoto bangos ilgio šviesai yra keletas kampų, kuriais bangos viena kitą stiprina, nes iki glaudžiamojo lęšio nusklinda atstumus, besiskiriančius sveikuoju bangos ilgių skaičiumi. Taip bus su šviesa, kurios difrakcijos kampas tenkina sąlygą $\lambda = d \sin\theta$. Šiuo kampu sklindanti šviesa sukurs pirmos eilės spektro vaizdą. Spektrai bus matomi ir kitomis kryptimis, kuriomis gretimų plyšelių spinduliuojamų bangų eigos skirtumas bus lygus 2, 3, 4 ar daugiau sveikųjų bangos ilgių. Bendru atveju n-osios eilės spektras susidarys ties kampu, kuris apskaičiuojamas pagal tokią formulę:

$$n\lambda = d \sin\theta$$

kur $n = 2, 3, 4$ ir t. t.; pavyzdžiui, $n = 2$ apibrėžia antrosios eilės spektrą.

Gardelės difrakcinio atvaizdo gaubtinė

Kiekvieno plyšio plotis yra labai svarbus parametras. 16.33a) pav. matyti, kad b sąlygoja kampinius difrakcinio maksimumo, gauto nuo vieno plyšio, matmenis. Tačiau ir atvaizdui nuo daugelio plyšių turi galioti pagrindinės bangų difrakcijos pro vieną siaurą plyšį taisyklės. Tai reiškia, kad spektras turi tilpti į siauro plyšio difrakcinio atvaizdo gaubtinę. 16.33 pav. pavaizduota ir paaiškinta difrakcija už vieno, dviejų ir daugiau siaurų plyšių.

Difrakcinės gardelės privalumai

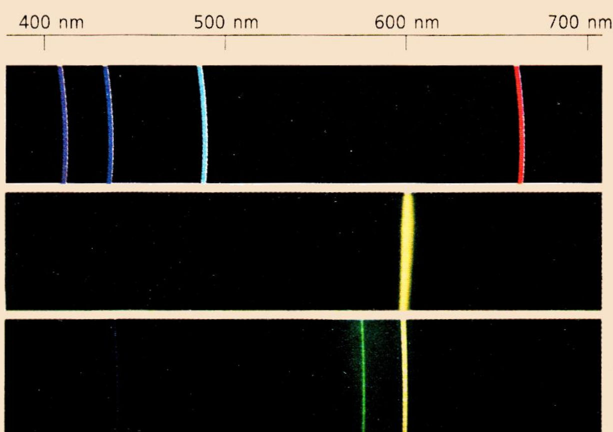
Jeigu d yra mažas, tai dydis $\sin\theta$ (taip pat ir θ) gali būti didelis. (Suprantama, spektras bus registruojamas tik tuomet, kai $\theta < 90°$.) Tai reiškia, kad difrakcinė gardelė išskleidžia įprastą regimąją ir artimą šiam diapazonui šviesą plačiu kampu, todėl galima įžiūrėti tokio spektro smulkiąją struktūrą.

Spektro ryškumas

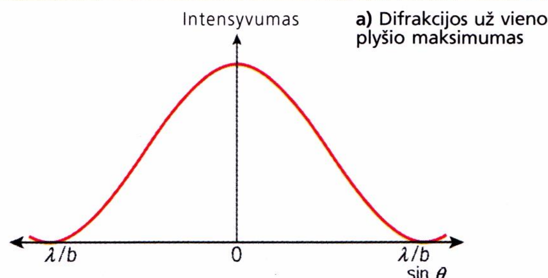
Kaip matyti 16.34 paveiksle, nors kiekvienas plyšys išspinduliuoja bangas visomis kryptimis, didžiausias kurio nors bangos ilgio šviesos intensyvumas stebimas tam tikru kampu. Panagrinėkime šviesą, sklindančią kampu, artimu θ. Tarkime, šviesos, sklindančios nuo pirmo ir antro plyšio kampu artimu θ, nueitų kelių eigos skirtumas yra vos 1/100 mažesnis už visą bangos ilgį. (Prisiminkite, kad kampu, tiksliai lygiu θ, difragavusių spindulių eigos skirtumas lygus visam bangos ilgiui.)

Kas vyksta esant daugeliui plyšių? Trečiojo plyšio „beveik“ θ kampu išspinduliuotos šviesos nueito kelio eigos skirtumas palyginti su pirmojo plyšio šviesa skirsis nuo viso bangos ilgio 2/100, ketvirtojo plyšio – 3/100 ir t. t. O 51 plyšio šviesos, sklindančios nagrinėjamu artimu θ kampu, eigos skirtumas skirsis nuo viso bangos ilgio 50/100, o tai reiškia, kad šios šviesos fazė *bus tiksliai priešinga vieno plyšio išspinduliuotos šviesos fazei*. Kaip jau išsiaiškinome anksčiau, priešingų fazių šviesa, šiuo atveju – šviesa nuo 1 ir 51 plyšių, nuslopins viena kitą. Tas pat atsitiks šviesai nuo 2 ir 52, 3 ir 53 ir t. t. plyšių. Jeigu gardelėje yra pakankamai plyšių, o taip tikriausiai ir bus, nes viename centimetre paprastai būna keletas tūkstančių plyšių, tai didžioji dalis plyšių, skleidžiančių šviesą artima θ kryptimi, nuslopins vienas kito šviesą.

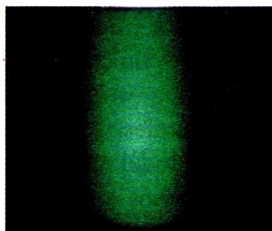
Vadinasi, bet kuri difrakcinė gardelė, kurioje yra daug plyšių, tam tikro bangos ilgio šviesą nukreips labai tiksliu ir siauru kampu, nes bet koks nukrypimas

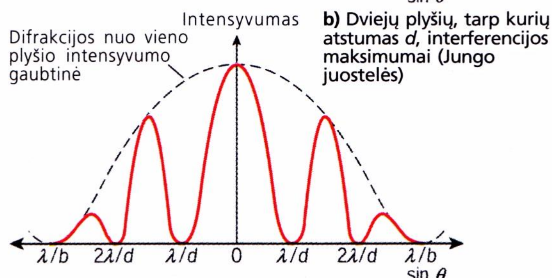


16.32 pav. **Linijiniai vandenilio (viršuje), natrio (viduryje) ir gyvsidabrio (apačioje) emisijos spektrai, gauti standartine gardele**

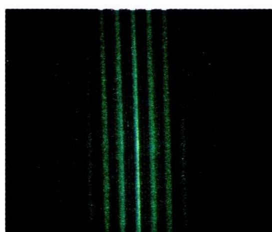


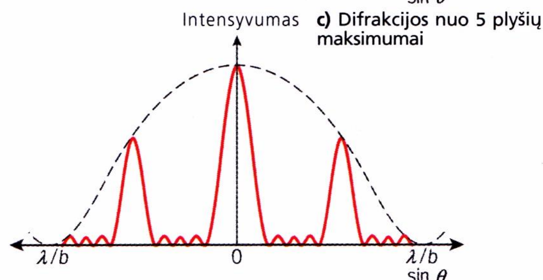
a) Difrakcijos už vieno plyšio maksimumas



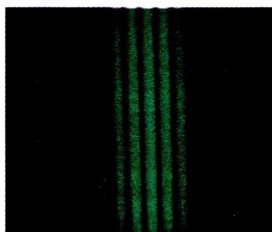


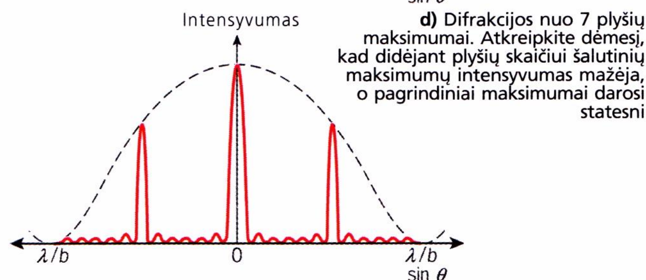
b) Dviejų plyšių, tarp kurių atstumas *d*, interferencijos maksimumai (Jungo juostelės)



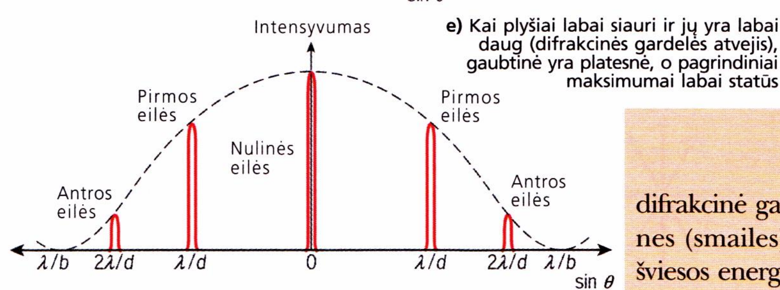


c) Difrakcijos nuo 5 plyšių maksimumai



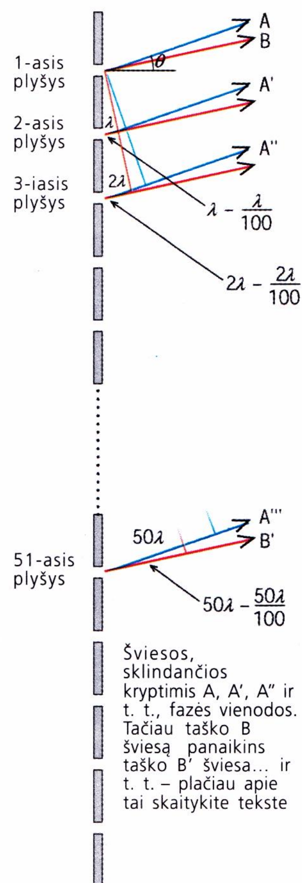


d) Difrakcijos nuo 7 plyšių maksimumai. Atkreipkite dėmesį, kad didėjant plyšių skaičiui šalutinių maksimumų intensyvumas mažėja, o pagrindiniai maksimumai darosi statesni



e) Kai plyšiai labai siauri ir jų yra labai daug (difrakcinės gardelės atvejis), gaubtinė yra platesnė, o pagrindiniai maksimumai labai statūs

16.33 pav. **Difrakcijos maksimumo gaubtinė ir difrakcijos juostos už 1, 2 ir daugiau plyšių: *b* – plyšio plotis; *d* – gardelės periodas**



16.34 pav. **Paaiškinimas, kodėl difrakcinėmis gardelėmis gaunami maksimumai yra labai aštrūs (žr. tekstą). Pastaba: kampai vaizdumo dėlei yra padidinti, todėl paveikslo detalės neatitinka realaus mastelio**

■ Žr. 10, 11 ir 14 klausimus.

nuo šio kampo bus smarkiai slopinamas. (To nukrypimo dydį lemia plyšių skaičius gardelėje bei krintančios šviesos bangos ilgio tikslumas.) Dėl to vieno bangos ilgio šviesos intensyvumų diagramoje bus matomos labai aštrios smailės, kaip pavaizduota 16.33e) paveiksle. Palyginkite šią diagramą su 16.33b), kurioje pavaizduoti intensyvumai esant dviems plyšiams.

Vis tik šviesa turi kažkur nukeliauti – juk praeinant difrakcinę gardelę jos energija neišnyksta. Vadinasi, difrakcinė gardelė ne tik sudaro aštrias spektro viršūnes (smailes), bet ir sukaupia jose visą krintančios šviesos energiją, dėl to gardelės difrakcijos maksimumai dar yra ir labai ryškūs.

Kadangi 16.33e) paveiksle matomos smailės aštrios ir siauros, tai su difrakcine gardele galima išskirti labai artimų bangos ilgių šviesą. Teoriškai galima įrodyti, kad jei gardelė turi N plyšių, tai tam tikro bangos ilgio šviesa, praėjusi tokią gardelę, nukryps kampu θ, o šviesos intensyvumas visomis kryptimis nuo $\sin\theta$ iki $\sin(\theta/N)$ bus lygus nuliui. Šis sąryšis galioja idealioms gardelėms. Praktiškai yra gana keblu pagaminti difrakcines gardeles taip tiksliai, kad jomis gaunami spektrai atitiktų teorinius duomenis.

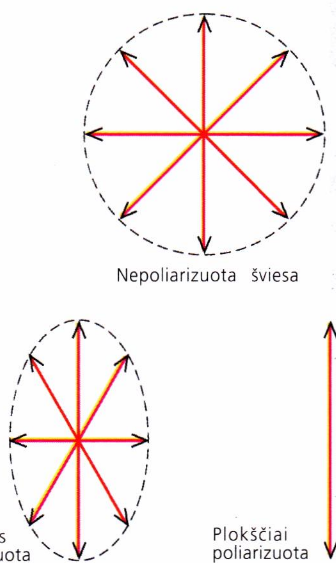
Šiuo metu nesudėtingiems tyrimams naudojamos gardelės, kurių viename centimetre yra apie 5000 rėžių. *Skaidrios* gardelės daromos ant gero optinio stiklo; spinduliai jose sklinda pro siaurus plyšelius tarp rėžių. Pigesnės gardelės daromos įspaudžiant plyšelius ant plastikinės plokštelės. *Atspindžio* gardelės išraižomos ant gero metalinio veidrodžio, todėl naudojant tokias gardeles išvengiama problemų, kurias sukelia šviesos sugertis. Veidrodžius išgaubus reikiamu kampu, spektrai gali būti dar ir suglaudžiami nenaudojant lęšių.

7 POLIARIZACIJA

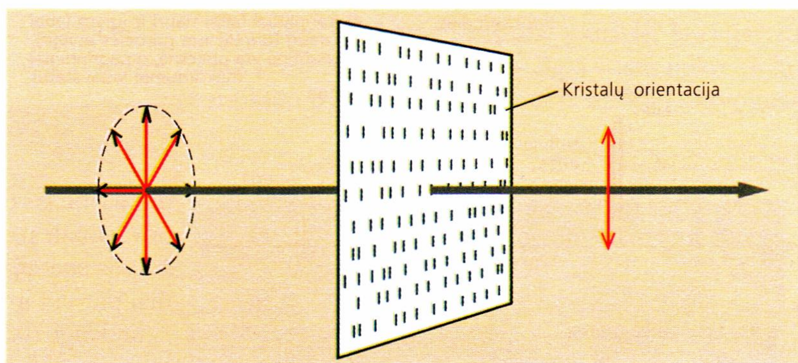
Elektromagnetinės bangos yra skersinės: abi elektrinė ir magnetinė dedamosios svyruoja statmenai bangos sklidimo krypčiai (žr. 16.3 pav.). Iš įprasto šviesos šaltinio sklindančiame bangų pluošte yra visų įmanomų krypčių, statmenų bangos sklidimo krypčiai, svyravimų. Jei elektrinis laukas svyruoja vienoje plokštumoje, tuomet sakoma, kad bangos yra poliarizuotos arba, tiksliau, **plokščiai poliarizuotos**.

Lengviausias būdas poliarizuoti šviesos pluoštą yra praleisti jį pro poliarizacinę plokštelę, pavyzdžiui, poliaroidą. Poliaroidą paprastai sudaro stiklo plokštelė, padengta plona herapatito kristalo plėvele. Šioje plėvelėje yra labai daug pailgų kristalėlių, kurie išsidėstę tvarkingai lygiagrečiai. Šie kristalėliai gerai sugeria tik tikrąją šviesą, kurios elektrinė dedamoji nukreipta išilgai ilgesniosios molekulių (ir kristalėlio) ašies, o statmeną dedamąją praleidžia. Dėl to praėjusi šviesa yra plokščiai poliarizuota (16.36 pav.). Ši šviesa jau nebeprasiskverbs pro kitą poliarizacinį filtrą, kurio orientacija bus statmena pirmajam.

Poliarizuota šviesa tapo įprastu reiškiniu kasdieniniame gyvenime. Pavyzdžiui, daugelis žmonių nešioja poliaroidinius saulės akinius, skaičiuokliuose ar laikrodžiuose yra skystųjų kristalų ekranai, nešiojamų kompiuterių vaizduoklių konstrukcija pagrįsta poliarizuotos šviesos veikimu. Poliaroidiniai saulės akiniai ir filtrai sumažina akinamą spindesį dėl to, kad sugeria poliarizuotą šviesos dedamąją.



16.35 pav. **Poliarizacija: schemose pavaizduota elektromagnetinės bangos elektrinė dedamoji „iš galo“, bangos sklidimo kryptimi**

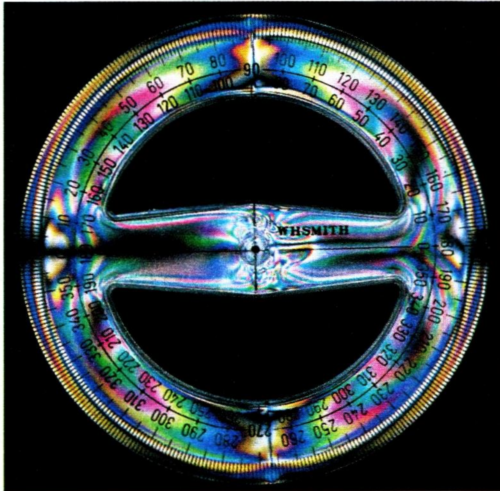


16.36 pav. **Poliarizacinė plokštelė praleidžia tik tokias šviesos bangas, kurių elektrinis laukas virpa viena kryptimi**

Atspindžio poliarizacija

Kai šviesą iš dalies atspindi skaidri aplinka, pavyzdžiui, stiklo plokštelė, tai ir atspindėta, ir lūžusioji šviesos dalis yra iš dalies poliarizuota (16.36 pav.). Kai tarp atspindėtos ir lūžusios šviesos yra status kampas, visa atsispindėjusi šviesa yra poliarizuota. Tai vyksta tuomet, kai kritimo kampas yra lygus Briusterio (*Brewster*) **kampui *B***, kur tg $B = n$, t. y. atspindinčios terpės lūžio rodikliui.

■ Žr. 12 klausimą.



16.37 pav. **Taip atrodo matlankis, kai į jį žiūrime pro du sukryžiuotus poliarizatorius**



16.38 pav. **Poliarizacinis filtras panaikina ekrane pašalinius atspindžius**

SANTRAUKA

Išnagrinėję skyrių jūs turėtumėte mokėti šiuos dalykus:

- Suvokti elektromagnetinių bangų prigimtį.
- Žinoti elektromagnetinio spektro savybes ir svarbiausias sritis.
- Žinoti, kas lemia elektromagnetinių bangų greitį ir mokėti pasinaudoti formule

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}$$

- Suprasti, kodėl elektromagnetinės bangos greičio pokytis sąlygoja šviesos **lūžimą** ir **dispersiją**.
- Suvokti elektromagnetinių bangų **superpoziciją**.
- Suprasti sąvokas **difrakcija** ir **interferencija** bei mokėti paaiškinti, kas vyksta, kai šviesa praeina pro vieną siaurą plyšelį ir kai pro du siaurus plyšelius (Jungo bandymas).
- Žinoti ir mokėti taikyti Jungo dviejų plyšių formulę:

$$\Delta x = \lambda D/s$$

- Išvesti Jungo dviejų plyšių interferencijos formulę:

$$n\lambda = d \sin \theta$$

ir žinoti, kaip šis bandymas gali būti panaudotas šviesos bangos ilgiui nustatyti.
- Žinoti dviejų bangų vorų interferencijos sąlygas ir **koherentiškumo** sąvoką.
- Suprasti optinio prietaiso skiriamosios gebos prasmę ir Reilėjaus lygties $\sin \theta = 1{,}22\ \lambda/b$ svarbą.
- Suprasti, kaip veikia difrakcinė gardelė, ir mokėti paaiškinti, kodėl ji yra laikoma svarbiu prizmės patobulinimu spektroskopijoje.
- Žinoti šviesos **poliarizacijos** esmę ir kaip tokia šviesa yra gaunama.

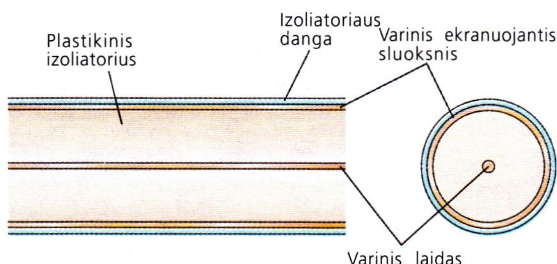
KLAUSIMAI

1 Trumpai paaiškinkite tris būdus, kaip aptikti infraraudonąją spinduliuotę.

2 Elektromagnetinę spinduliuotę sudarantys elektrinis ir magnetinis laukai yra statmeni vienas kitam. Aprašykite kitą analogišką fizikinę situaciją ar reiškinį, kai elektra ir magnetizmas turi statmenumo požymį.

3 Televizijos kabelinėje antenoje elektromagnetinės bangos sklinda plastikiniame izoliatoriaus sluoksnyje tarp vidurinio varinio laido ir cilindrinio varinio ekranuojančio apvalkalo.

a) Kodėl elektromagnetinių bangų greitis kabelyje skiriasi nuo šviesos greičio vakuume?



16.K3 pav. **Supaprastinta televizijos koaksialiojo kabelio konstrukcijos schema**

b) Plastikinio izoliatoriaus dielektrinė skvarba ε lygi $2{,}2 \times 10^{-11}$ F · m^{-1}, o magnetinė skvarba $\mu = 1{,}2 \times 10^{-6}$ H · m^{-1}. Naudodamiesi šiais duomenimis apskaičiuokite TV signalo greitį kabelyje, pagamintame iš tokio izoliatoriaus.

c) Toks plastikas galėtų būti naudojamas elektromagnetines bangas suglaudžiančių lęšių gamybai. Koks būtų tokios medžiagos lūžio rodiklis?

4 Kai susitinka dvi bangos, jų *superpozicija* gali sukelti interferenciją. Nubraižykite šį reiškinį iliustruojančias schemas ir paaiškinkite jas.

5 Detektoriumi galima užregistruoti tam tikrą akiai nematomą spinduliavimą su tiesine 2 cm skyra. Manoma, kad tiriamąjį spinduliavimą sudaro bangos, kurių bangos ilgiai gali būti nuo 1 iki 5 cm.

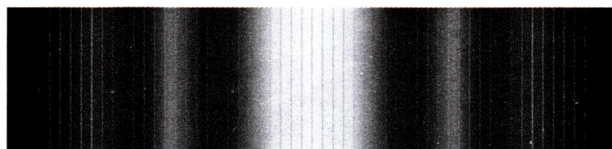
a) Pasiūlykite eksperimentinę schemą, kuri aiškiai parodytų, jog tiriamasis spinduliavimas yra bangų pavidalo.

b) Sukurkite eksperimentą arba patobulinkite **a)** klausimo atsakyme aprašytą bandymą, kuris leistų išmatuoti spinduliuotės bangos ilgį (sakykime, 10% tikslumu).

6 16.K6 paveiksle pavaizduotas Jungo dviejų plyšių bandyme gautas juostelių raštas.

a) Paaiškinkite, kodėl juostelių raštas didėjant kampui iš pradžių tarsi išnyksta, o po to vėl atsiranda.

b) Naudodamiesi pateikta nuotrauka atlikite būtinus matavimus ir įvertinkite plyšius skiriančio atstumo ir plyšių pločio santykį.



16.K6 pav. **Pro du plyšius praėjusios šviesos juostelės su difrakciniais minimumais**

7 Du garsiakalbiai, skleidžiantys to paties dažnio garso bangas, sukuria interferencinę struktūrą erdvėje, sudarytą iš garso ir tylos sričių. Tai kodėl šviesdami dviem žibintais į kokį nors ekraną nematome interferencinio vaizdo?

8 Maža moneta priklijuojama prie stiklinės plokštelės ir padedama lazerio spindulio kelyje. Ekrane stebimą monetos šešėlį supa tamsios ir šviesios juostelės, o pačiame centre yra šviesi dėmelė. Paaiškinkite bendrais bruožais, kodėl taip yra.

9 Jodrell Bank Lovell'o radioteleskopo skersmuo yra 76 m, teleskopo darbo bangos ilgis 8 cm. Žmogaus akis yra jautriausia žaliai šviesai, kurios bangos ilgis apie 5×10^{-7} m.

a) Įvertinkite (arba išmatuokite naudodamiesi veidrodžiu ir liniuote) savo akies vyzdžio skersmenį.

b) Apskaičiuokite, kuris iš šių elektromagnetinių bangų detektorių pasižymi geresne skyra. Kiek kartų?

10 Difrakcinė gardelė, naudojama 29 mm ilgio mikrobangų tyrimams, sudaryta iš keleto lygiagrečių varinių juostelių, atskirtų 75 mm tarpais. Kokiais kampais bus stebimi pirmosios ir antrosios eilės difrakcijos maksimumai?

11 Natrio spinduliavimo spektre yra dvi geltonos linijos, kurių bangos ilgiai labai panašūs: $5{,}896 \times 10^{-7}$ m ir $5{,}890 \times 10^{-7}$ m. Šios linijos matomos naudojantis difrakcine gardele, kurios 1 centimetre yra 6000 linijų.

a) Kokiu kampiniu atstumu šios linijos yra nutolusios viena nuo kitos pirmosios eilės spektre?

b) Jūsų akies lėliukės skersmuo tamsoje yra maždaug apie 3 mm. Ar galėtų jūsų akys be jokio prietaiso išskirti šias linijas?

12 Nuo lygios ledo plokštumos 53° kampu atsispindėjusi šviesa yra plokščiai poliarizuota. Koks yra ledo lūžio rodiklis?

16 ir 17 skyrių schema pateikta 43 puslapyje

13 Nevienodų matmenų akies vyzdžių skiriamoji geba yra skirtinga.

a) Žmogaus akies vyzdžio skersmuo yra apie 4 mm. Kokiu mažiausiu kampu (rad) tokia akis pakankamai skiria 600 nm ilgio bangų sukurtą atvaizdą?

b) Pelės akies vyzdžio skersmuo tik 1 mm. Apskaičiuokite:

(i) kiek šviesos patenka į pelės akį per 1 s / kiek šviesos patenka į žmogaus akį per 1 s.

(ii) pelės akies mažiausią kampinę skyrą / žmogaus akies mažiausią kampinę skyrą.

c) Iš tikrųjų pelė gali skirti tik du 10 cm dydžio objektus, jei nuotolis iki jų 2 m.

(i) Apskaičiuokite pelės akyje sudaromą kampą tarp tų objektų.

(ii) Pateikite fizikinį paaiškinimą, kodėl pelės regos organo kampinė skyra tokia maža palyginti su teorine skyros verte.

14

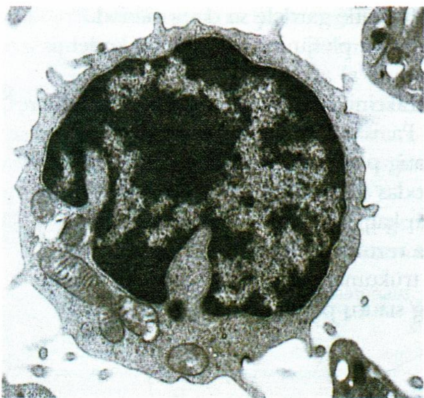
a) Aprašykite bandymą, kuriuo gautumėte difrakcinį atvaizdą už dviejų lygiagrečių plyšių su tarpu d, sklindant pro juos λ ilgio šviesai. Nupieškite difrakcinį atvaizdą skirtingo intensyvumo šviesai sklindant kampu į pavyzdį.

b) Nupieškite difrakcinį atvaizdą, kurį gautumėte naudodami difrakcinę gardelę su daug vienodu periodu d padarytų plyšių ir paaiškinkite, kodėl jis skiriasi no gautojo **a)** atveju.

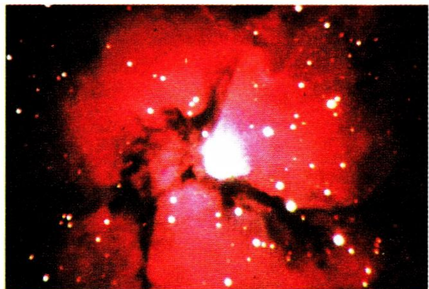
c) Nupieškite difrakcinį atvaizdą, kurį gautumėte padarę platų plyšį $\boldsymbol{a}$. Paaiškinkite gautąjį atvaizdą.

d) Gardelė su daug plačių plyšių, kurių plotis a ir gardelės periodas d, gali būti padaryta iš dviejų gardelių, tokių kaip **b)** ir **c)**. Parinkite $d = 2a$ ir apskaičiuokite rezultatą. Kokie tokios gardelės privalumai ir trūkumai palyginti su gardele, kurioje padaryta daug siaurų plyšių.

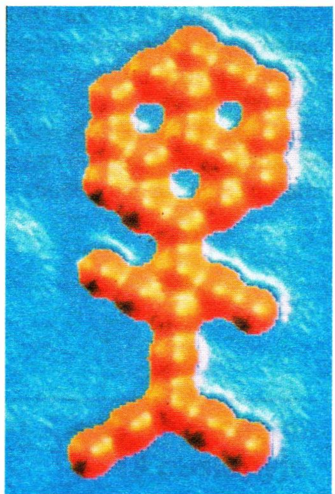
17 Atomai, spektrai ir kvantai



Šiame paveikslėlyje pavaizduotas elektroniniu mikroskopu padidintas baltasis kraujo kūnelis, padedantis organizmui įveikti ligas. Vaizdą sukuria į kraujo bandinį nukreiptas elektronų srautas. Šiuo atveju elektronai, kurie neabejotinai yra dalelės, pasireiškia kaip bangos



Šis Trifido ūko vaizdas gautas naudojantis elektroniniu šviesos detektoriumi (anglų k. jis vadinamas *charge-coupled device* – sutrumpintai *CCD*); jo veikimas pagrįstas tuo, kad šviesa sudaryta iš dalelių, nors dažniausiai ji pasireiškia kaip banga



Maži kauburėliai šiame paveikslėlyje yra atomų kontūrai, apibrėžiami elektronų debesėliais. Paveikslas gautas nuskaitančiuoju tuneliniu mikroskopu (anglų k. *scanning tunnelling microscope – STM*), kurio veikimas pagrįstas ne tik banginėmis elektronų savybėmis, bet ir vadinamuoju „tuneliniu" reiškiniu, t. y. elektronų gebėjimu prasiskverbti pro nedidelius energijos barjerus

Šio puslapio iliustracijos gautos naudojant sudėtingą techniką, kurios veikimas pagrįstas banginėmis dalelių, šiuo atveju elektronų, savybėmis, taip pat šviesos, kuri 16 skyriuje apibrėžta kaip bangos, daleline prigimtimi. Tai *kvantinės fizikos* sritis; ši fizikos teorija laikoma viena iš sėkmingiausių tiek aiškinant žinomus, tiek ir nuspėjant naujus, anksčiau nestebėtus ir neaptikus, reiškinius.

Tokių galingų atvaizdų sudarymo prietaisų veikimas pagrįstas mažiausiųjų medžiagos sudėtinių dalių – atomų, elektronų ir šviesos bangų – kvantinėmis savybėmis. Šie reiškiniai skatina susimąstyti apie to, kas yra „realu", prasmę, ir būti pasirengusiems atsisakyti kai kurių idėjų, puikiai tikusių paaiškinti ir numatyti savybes tokių įprastinių kūnų, kaip automobiliai, teniso kamuoliukai arba planetos.

Apžvalga

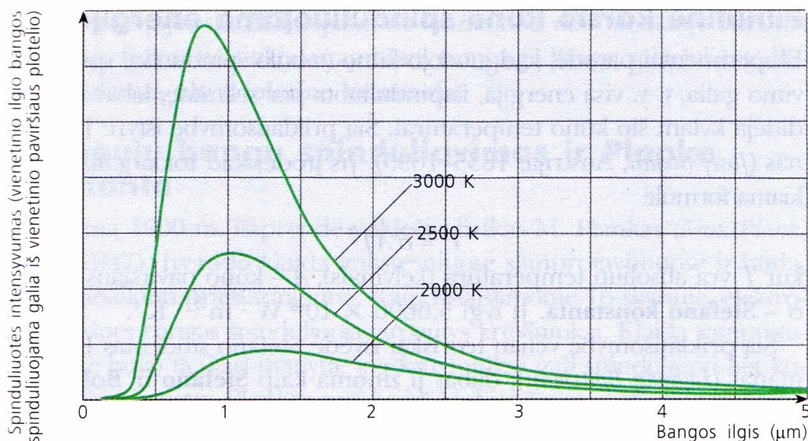
Fizikai išvystė kvantinę teoriją tik dvidešimtajame amžiuje. Iki atsirandant šiai teorijai buvusi fizika vadinama **klasikine fizika**; atsiradus kvantinei, ji tapo **moderniąja fizika**. Kvantinė teorija gimė iš dviejų, sakytume, visiškai skirtingų fizikos sričių.

Pirmiausia klasikinėje fizikoje buvo aptiktas nedidelis nesklandumas, atrodęs kaip neesminis ir laikinas tobulos teorijos, išvystytos devynioliktajame amžiuje ir taikytos mėginant paaiškinti **elektromagnetinę spinduliuotę**, trūkumas. Ši teorija negalėjo paaiškinti karšto kūno, vadinamo **juoduoju kūnu**, spinduliuojamo spektro.

Be to, visiškai atsitiktinai buvo atskleistas **radioaktyvumo** reiškinys, kurio aprašymą rasite sekančiame, 18 skyriuje. Šis reiškinys privertė fizikus sukurti naują atomo modelį ir pradėti tyrinėti atomų branduolius. Tačiau pagal to meto teorijas atomas su apie branduolį skriejančiais elektronais turėjo tučtuojau suirti, nes elektronai, spinduliuodami elektromagnetines bangas, taigi prarasdami energiją, turėjo nesulaikomai kristi į branduolį. Tačiau taip neatsitinka, atomai yra stabilūs. Taigi buvo reikalinga nauja teorija, kuri paaiškintų šiuos du neišspręstus klausimus.

1 KARŠTOJO KŪNO IŠTISINIS SPEKTRAS

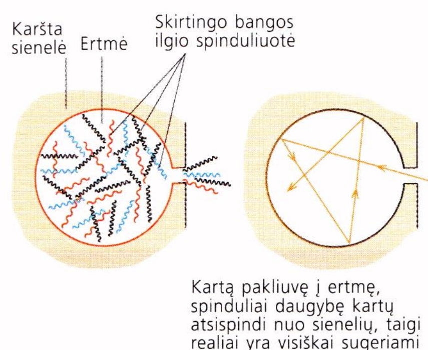
Karšti kūnai spinduliuoja elektromagnetines bangas, kurių intensyvumo priklausomybę nuo bangos ilgio nusako kreivės, nubrėžtos esant skirtingoms temperatūroms. Tokia priklausomybė vadinama **temperatūrinio, šiluminio spinduliavimo** arba **juodojo kūno spinduliavimo** kreive. 17.1 pav. parodyta įkaitusio kūno spinduliavimo intensyvumo priklauso-



17.1 pav. Grafikai rodo karšto kūno spinduliuotės pasiskirstymo pagal bangos ilgį kitimą kylant temperatūrai: kreivės viršūnė slenka į trumpesniųjų bangų ilgių sritį. Įsitikinkite, kad sandauga λ_{max} T išlieka pastovi. Visą išspinduliuojamą energiją atitinka plotas srities, esančios po kreive

mybė nuo bangos ilgio; kiekviena iš kreivių atitinka tam tikrą temperatūrą, kurioje atliktas bandymas.

Realių kūnų spinduliavimas gali ir neatitikti šių kreivių, ypač esant žemoms temperatūroms, todėl patogu apibrėžti ir tirti tam tikrą idealų, arba „tobulą" spinduolį, vadinamąjį **juodąjį spinduolį**. Čia nepateikiame argumentų, kuriais grindžiami samprotavimai, jog tobulas *spinduolis* kartu yra ir idealus spinduliuotės imtuvas (sugeriantis spinduliuotę kūnas). Kūnas, sugeriantis visą į jį sklindančią spinduliuotę, atrodo esantis juodas, – iš čia ir pavadinimas *juodasis kūnas* (17.2 pav.).



17.2 pav. Ertmės, arba juodojo kūno, spinduliuotė. Masyvaus karšto kūno viduje spinduliavimas nusakomas tam tikra intensyvumo pasiskirstymo priklausomybe nuo bangos ilgio. Tikslus pasiskirstymas priklauso tik nuo temperatūros. Maža skylutė sienelėje reikalinga, kad spinduliai galėtų išeiti į išorę ir būtų galima juos analizuoti

Nesunku pastebėti, kad visos kreivės, pateiktos 17.1 pav., yra gana panašios. Intensyvumas visada esti didžiausias sklindant tam tikro ilgio bangoms, tarkime, λ_{max}. Kuo aukštesnė kūno temperatūra, tuo mažesnis λ_{max}. Šis sąryšis tenkina Vilhelmo Vyno (*Wilhelm Wien*, Vokietija, 1864–1928) dėsnį, eksperimentiškai nustatytą 1893 m., žinomą kaip **Vyno poslinkio dėsnis:**

$$\lambda_{max} T = \text{const},$$

kur T yra kūno absoliuti temperatūra (kelvinais). Konstantos vertė lygi $2{,}898\times10^{-3}$ m · K. Be to, kylant temperatūrai kreivės amplitudė vis didesnė, o tai reiškia, kad kuo karštesnis yra kūnas, tuo daugiau energijos jis išspinduliuoja per sekundę.

Šalti kūnai spinduliuoja infraraudonuosius spindulius. Kaitinami jie pradeda spinduliuoti regimąją šviesą – pirmiausia tampa raudoni (esant maždaug 700 K temperatūrai), vėliau – balti, galų gale žydri, kadangi kylant temperatūrai spinduliuojami vis mažesnio bangos ilgio spinduliai.

■ Žr. 1–4 klausimus.

PAVYZDŽIAI

K Koks bangos ilgis atitinka didžiausią: **a)** Saulės, **b)** žmogaus kūno spinduliavimo intensyvumą? (Tarkime, Vyno konstanta lygi $2{,}9\times10^{-3}$ m · K, Saulės paviršiaus temperatūra lygi 6000 K, o žmogaus odos temperatūra – apie 35°C).

A a) Saulės paviršiaus temperatūra lygi 6000 K, todėl pagal Vyno dėsnį:

$$\lambda_{max}\times6000 = 2{,}9\times10^{-3}\ \text{m}\cdot\text{K};\ \lambda_{max} = 4{,}8\times10^{-7}\ \text{m}$$

b) Žmogaus odos temperatūra yra 308 K, taigi:

$$\lambda_{max}\times308 = 2{,}9\times10^{-3}\ \text{m}\cdot\text{K};\ \lambda_{max} = 9{,}4\times10^{-6}\ \text{m}$$

Pavyzdžio paaiškinimas

Saulės spinduliavimo intensyvumas pasiekia didžiausią vertę esant bangos ilgiui 480 nm, o tai atitinka žalios spalvos regimąjį spinduliavimą. Žmogaus kūno spinduliuojamos maždaug 10 μm ilgio bangos rodo, kad jis intensyviausiai spinduliuoja infraraudonuosius spindulius; būtent į juos reaguoja dabar vis dažniau vartojami jutikliai, įjungiantys pavojaus sirenas arba šviesą, patalpon įėjus žmogui.

Pilnutinė karšto kūno spinduliuojama energija

Eksperimentai parodė, kad juodojo kūno (tobulo spinduolio) spinduliavimo galia, t. y. visa energija, išspinduliuota per sekundę, labai sparčiai didėja kylant šio kūno temperatūrai. Šią priklausomybę ištyrė J. Stefanas (*Josef Stefan*, Austrija, 1835–1893). Jis įrodė, kad tokia galia išreiškiama formule

$$P = \sigma A T^4$$

kur T yra absoliuti temperatūra (kelvinais), A – kūno paviršiaus plotas, σ – **Stefano konstanta**. Ji lygi $5{,}6696 \times 10^{-8}\ \mathrm{W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}}$.

Šią priklausomybę vėliau teoriškai išvedė Stefano studentas L. Bolcmanas (*Ludwig Boltzman*); dabar ji žinoma kaip **Stefano ir Bolcmano dėsnis**.

2 PLANKAS IR PIRMOJI KVANTŲ TEORIJA

Ultravioletinė katastrofa

Tolydųjį karštųjų kūnų spinduliavimą nusakantys dėsniai buvo ištirti devynioliktajame šimtmetyje. Dėsnis, nusakantis ryšį tarp kūno temperatūros ir spinduliuotės intensyvumo, vadinamas **Reilėjaus ir Džinso dėsniu**. Jis sieja tam tikro bangos ilgio λ spinduliavimo intensyvumą su absoliučiąja juodojo kūno temperatūra:

$$I = \frac{2\pi ckT}{\lambda^4}$$

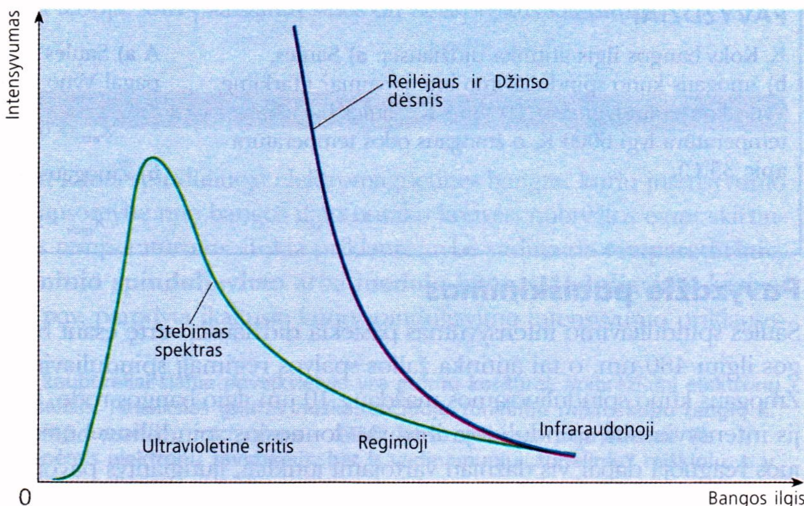
kur c yra šviesos greitis, o k – Bolcmano konstanta (1-os d. 7 sk., 160 p.). I yra spinduliuotės, kurios bangos ilgis yra intervale nuo λ iki λ + Δλ, galia, spinduliuojama iš vienetinio kūno paviršiaus plotelio. Ši lygtis sudaryta laikantis nuostatos, kad elektromagnetines bangas spinduliuoja virpantys krūvininkai (žr. 7 p.). Šie osciliatoriai buvo įsivaizduojami kaip juodojo kūno paviršiuje esantys atomai.

Deja, ši formulė turi didelį trūkumą – ji nenusako eksperimentų rezultatų. Formulės vardiklis λ^4 reiškia, kad, sakykime, Saulė, kurios T yra 6000 K, mažėjant bangos ilgiui turi spinduliuoti vis didesnį energijos kiekį (17.3 pav.).

Jau ultravioletinėje srityje jie yra milžiniški, o dar trumpesnio bangos ilgio srityje tampa begaliniais. Iš tikrųjų grafike matyti, kad už Stefano maksimumo eksperimentinė kreivė užlinksta, t. y. toliau mažėjant bangų

?

A Naudodamiesi Reilėjaus ir Džinso formule apskaičiuokite Saulės (temperatūra lygi 6000 K) spinduliavimo intensyvumą esant bangos ilgiui 10^{-3} m (infraraudonasis spinduliavimas) ir 3×10^{-7} m (ultravioletinis spinduliavimas). Palyginkite gautus rezultatus su pavaizduotais 17.1 pav. ir paaiškinkite gautus nesutapimus.



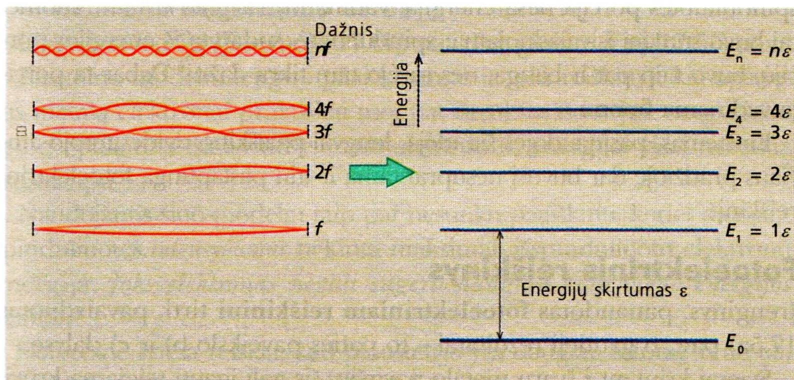
17.3 pav. **Reilėjaus ir Džinso formulė aprašo stebėjimų duomenis tik ilgų bangų srityje ir labai karštiems kūnams**

ilgiams energijos spinduliuojama vis mažiau. Šis devynioliktojo amžiaus klasikinės fizikos neatitikimas aprašant trumpųjų bangų spinduliuotę buvo vadinamas **ultravioletine katastrofa**.

■ Žr. 5 klausimą.

Trumpųjų bangų spinduliavimas ir Planko konstanta

Problemą 1900 m. išsprendė vokiečių fizikas M. Plankas (*Max Plank*, 1858–1947). Jis rado klaidą ankstesniuose samprotavimuose ir būdą, kaip panaikinti prieštaringumą. Kaip išsiaiškinome 16 skyriuje, elektromagnetines bangas spinduliuoja virpantys krūvininkai. Klaida samprotavimuose buvo ta, kad manyta, jog krūvininkai gali spinduliuoti bet kurio dažnio bangas. Plankas sugalvojo, kad jei šie osciliatoriai yra panašūs į muzikos instrumento stygas, tai jie turėtų spinduliuoti ne bet kokias, o tik *tam tikro dažnio bangas*. 17.4a) pav. pavaizduotos įtvirtintos stygos pagrindinės harmonikos; jos gali būti bet kokio dažnio kartotiniai, t. y. tie dažniai yra ne bet kokie, o kvantuoti.



17.4a) pav. **Savaiminiai įtvirtintos stygos virpesiai gali būti tik tam tikro dažnio. Dažnis yra kartotinis**

17.4b) pav. **Osciliatoriaus energija taip pat kartotinė; atstumai tarp gretimų energijos lygmenų yra vienodi**

Matematiškai užrašęs tokią išvadą, M. Plankas nustatė, kad trumpųjų bangų ilgių (didelių dažnių) srityje atsiranda natūrali riba, nuo kurios dažniai negali mažėti bet kaip. Gautoji formulė, siejanti intensyvumą su bangos ilgiu, atitiko eksperimentų duomenis.

Taip pat jis įrodė, kad, panašiai kaip vibruojančioje stygoje, osciliatoriaus energija yra proporcinga jo virpesių dažniui f:

$$E = hf$$

kur h yra **Planko konstanta**, lygi $6{,}626 \times 10^{-34}$ J · s

Osciliatoriaus dažnis, kaip ir įtvirtintos stygos ar Planko virpančių krūvių dažniai, negali kisti tolygiai, o įgyja tik tam tikras reikšmes, lygias f, $2f$, $3f$,..., nf, kur f yra pagrindinis dažnis, n – sveikasis skaičius, vadinamas **kvantiniu skaičiumi**. Energiją su dažniu siejanti Planko formulė reiškia, kad osciliatoriaus energija negali kisti tolygiai, o tik mažais diskretiniais dydžiais, vadinamaisiais kvantais. Kitais žodžiais tariant,

$$\text{osciliatoriaus energija} = hf,\ 2hf,\ 3hf...\ nhf$$

Atkreipkite dėmesį, kad tai panašu į 17.4 pav. pateiktus vaizdus. Už savo teoriją M. Plankas 1919 m. gavo Nobelio premiją.

Einšteinas ir šviesos kvantavimas

Plankas, deja, neįstengė žengti sekančio žingsnio, kuriuo būtų nustatęs, kad *spinduliuotė taip pat yra kvantuota*, t. y. pasiskirsčiusi mažomis porcijomis. Šį žingsnį žengė niekam iki tol nežinomas 26 metų amžiaus Šveicarijos Berno miesto Patentų biuro tarnautojas Albertas Einšteinas. Jo argumentai buvo paprasti:

- Virpantis krūvininkas gali sugerti arba išspinduliuoti tik mažas energijos porcijas $\Delta E = h\Delta f$, kur Δf yra dažnio pokytis.
- Jis sugeria arba spinduliuoja energiją tik elektromagnetinės spinduliuotės būdu.
- Taigi pati spinduliuotė irgi turi būti sudaryta iš mažų porcijų, kurių kiekviena perduoda energiją, lygią ΔE.

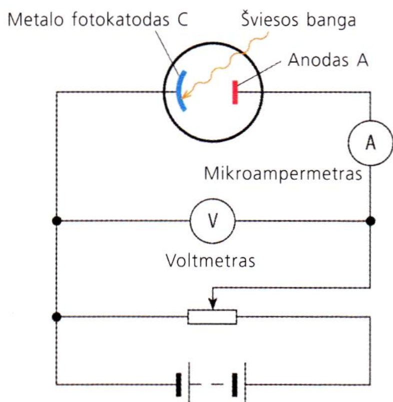
Einšteinas suvokė, kad ir spinduliuotė turi tenkinti Planko formulę, turėti savąjį dažnį f_{spind} ir jos energija su dažniu turėtų būti susijusi šitokiu sąryšiu:

$$E_{\text{spind}} = hf_{\text{spind}}$$

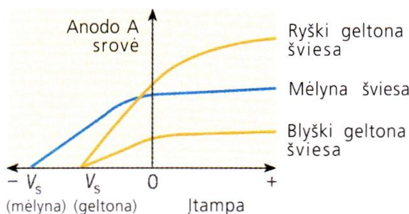
Tai reiškė, kad karštojo kūno spinduliuotė nėra tolydi. Kiekviena spinduliuotės porcija neša energiją, vadinamą *energijos kvantu*. Tuomet tai buvo sunkiai įsivaizduojama: spinduliuotė, sudaryta iš energijos porcijų, buvo taip pat ir banga, nes turėjo tam tikrą dažnį! Dabar ta porcija vadinama **fotonu**.

Einšteinas, pasinaudojęs šia idėja, lengvai paaiškino dvidešimtojo amžiaus pradžioje dar buvusį nesuprantamą ir itin paslaptingą fotoelektrinį reiškinį.

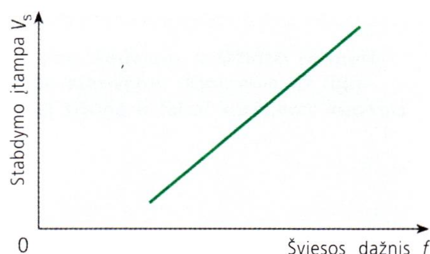
Žr. 6 ir 7 klausimus.



17.5a) pav. **Teigiamo krūvio anodas A pritraukia visus elektronus, išspinduliuotus iš katodo C**



17.5b) pav. **Palaipsniui mažinant anodo A įtampą, anodo srovė irgi mažėja. Įtampai V tapus neigiamai (V_s), srovė grandinėje išnyksta. Vadinasi, neigiama įtampa gali sustabdyti pačius greičiausius (turinčius didžiausią kinetinę energiją) elektronus**



17.5c) pav.
$E_{K\,max} = eV_s$,
kur $E_{K\,max}$ – didžiausia kinetinė energija, e – elektrono krūvis. Spinduliavimo intensyvumas neturi įtakos V_s dydžiui, tačiau spalva (dažnis) turi, nes:
$E_{K\,max} = hf - W$

Žr. 8 klausimą.

Fotoelektrinis reiškinys

Įrenginys, panaudotas **fotoelektriniam reiškiniui** tirti, pavaizduotas 17.5a) pav., o gautieji rezultatai – to paties paveikslo b) ir c) dalyse.

Šviesai krintant į švarų metalo paviršių, šis gali įgauti teigiamą krūvį. Mat laisvieji metalo elektronai, sugėrę šviesos bangų atneštą energiją, įgyja kinetinės energijos, pakankamos tam, kad „iššoktų" iš metalo. Tačiau fotoelektriniam reiškiniui būdinga keletas keistų ir sunkiai paaiškinamų ypatumų, kurių neįmanoma paaiškinti įsivaizduojant šviesą tik kaip bangas (žr. 17.6a) pav.).

Visų pirma, elektronai iš metalo neištrūksta, kol krintančios į paviršių šviesos dažnis nepasiekia tam tikros vertės. Pavyzdžiui, mėlyna šviesa natryje sukelia fotoelektrinį reiškinį, o raudona – ne. Gal raudonieji spinduliai neturi pakankamai energijos? Pagal bangų modelį, nors raudonosios bangos ir yra mažesnės energijos nei mėlynosios, jos vis tik turėtų suteikti pakankamai energijos elektronams išlėkti iš metalo. Deja, praktiškai taip neatsitinka.

Antra, apšvietus natrio paviršių kad ir visai silpnu mėlynųjų spindulių pluoštu, elektronai tučtuojau pradeda išsilaisvinti. Remiantis bangų teorija sunku paaiškinti, kodėl tai atsitinka taip greitai; juk šviesa vienodai pasiekia paviršių, todėl neaišku, kaip ji gali taip sutelktai pasiskirstyti ir išlaisvinti tik keletą elektronų.

Trečiąjį fotoefekto ypatumą taip pat sunku paaiškinti. Elektronai palieka metalo paviršių turėdami kinetinę energiją, suteiktą kritusio šviesos pluošto. Vieni turi mažiau, kiti daugiau kinetinės energijos, ir eksperimentai rodo, kad *didžiausia* kinetinė energija, kurią turi išlaisvintas elektronas, $E_{K\,max}$, priklauso ne nuo šviesos *intensyvumo*, o tik nuo jos *dažnio*. Silpnas ultravioletinių spindulių pluoštelis išlaisvintiems iš to paties natrio elektronams suteikia daugiau energijos negu labai intensyvus mėlynųjų spindulių pluoštas.

Einšteino teorija, pagal kurią šviesa sklinda porcijomis, o jų energijos yra proporcingos dažniui, labai paprastai paaiškina visus šiuos faktus. Fotoelektrinio reiškinio metu visa energija, kurią neša ta šviesos porcija (fotonas), yra perduodama vienam elektronui. Dalis energijos suvartojama įveikti tą elektroną metale laikančių jėgų pasipriešinimui dar prieš elektronui paliekant metalą. Tarkime, mažiausia šiam darbui atlikti reikalinga energija lygi W, kaip pažymėta 17.6b) pav. Jei elektronas iš fotono gauna energiją, lygią E, tai tuomet *didžiausia* kinetinė energija, kurią jis gali turėti išlėkęs iš metalo, bus

$$E_{\text{K max}} = E - W$$

Pagal Einšteino formulę $E = hf$, taigi:

$$E_{\text{K max}} = hf - W \text{ arba } hf = E_{\text{K max}} + W$$

Šis modelis paaiškina eksperimentų rezultatus, nes:

- Jei hf yra mažesnis nei W, elektronai iš metalo neišlekia.
- Egzistuoja **slenkstinis** dažnis f_0 – toks, kad $hf_0 = W$.
- Kreivė, nusakanti $E_{\text{K max}}$ priklausomybę nuo f, yra tiesė, kertanti energijos ašį taške $-W$ ir turinti polinkį, lygų h.

W vadinama **išlaisvinimo darbu** (17.1 lentelė).

Einšteino teoriją iliustruoja 17.6b) pav. Palyginkite jį su 17.5c) pav.

Einšteino modeliu lengvai paaiškinamas ir toks reiškinys, kai apšviestus metalą elektronai praktiškai tuoj pat ištrūksta iš jo. Juk netgi vieno fotono pakanka išlaisvinti vienam elektronui, energijai visai nereikia „susikaupti“.

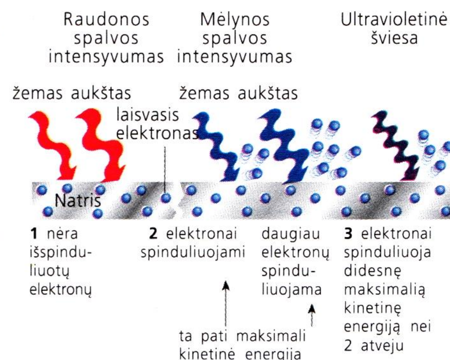
Naudojantis šiuo modeliu taip pat nesunku paaiškinti, kodėl didėjant spinduliuotės *intensyvumui* nekinta maksimali išspinduliuotų elektronų energija. *Joks elektronas negali sugerti daugiau kaip vieno energijos kvanto*:

- Skaistesnė šviesa reiškia, kad pluoštelyje yra daugiau fotonų, o ne tai, kad kiekvieno fotono energija yra didesnė.
- Skaistesnė šviesa išlaisvina daugiau elektronų, bet kiekvienas jų negali dėl to įgyti daugiau energijos.

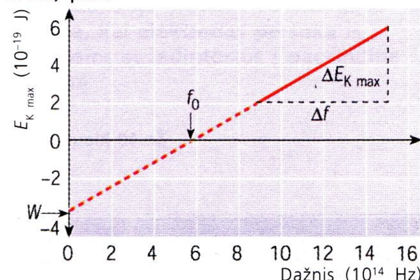
Daugeliui fizikų tais laikais Planko ir Einšteino kvantinė teorija buvo tik „teoriniai“ samprotavimai, iki 1922 m. A. Komptonas (*Arthur Compton*, JAV, 1892–1962) atliko bandymus, kuriais patvirtino, kad rentgeno spinduliai, susidurdami su elektronais, elgiasi kaip dalelės (**Komptono sklaida** – 24 skyrius). Paaiškėjo, kad fotonai turi ne tik energijos, bet ir tam tikrą *judesio kiekį*. Tai taip pat keistai atrodė, nes judesio kiekis apibrėžiamas kaip masės ir greičio sandauga, o fotonas masės, kaip žinoma, neturi. Tačiau, kaip sužinosite 25 skyriuje, visa energija lygiavertė tam tikrai masei, todėl galų gale nieko keisto čia nėra.

3 KVANTINĖ TEORIJA IR ATOMAS SU BRANDUOLIU

Dviem būdais galima nustatyti, iš ko sudaryti atomai ir kitos mikroskopinės dalelės. Pirmuoju būdu reikėtų remtis kuo nors dar mažesniu ir patyrinėti, kaip tas mažesnysis elgiasi atsimušęs į pirmąjį arba kaip tas tiriamasis skyla jiems susidūrus. Antruoju būdu reikėtų patyrinėti, kaip dalelė elgiasi, kai jai suteikiama didelė energija; kitais žodžiais tariant, reikia stebėti, kas byra iš tiriamojo kūno jį kratant. Abiem šiais būdais pasinaudojo fizikai, kuriems knietėjo sužinoti, kaip atrodo atomai ir iš ko jie yra sudaryti.



17.6a) pav.



17.6b) pav. **Einšteino fotoelektrinės lygties $E_{\text{K max}} = hf - W$ grafikas.**
Kai šviesos dažnis mažesnis nei f_0, elektronai neišlekia.
Kai tiesė kerta ašį taške $f = f_0$, $W = h \cdot f_0$.
Tiesės polinkis lygus Planko konstantai h:

$$h = \Delta E_{\text{K max}} / \Delta f$$

17.1 lentelė. **Kai kurių metalų išlaisvinimo darbas**

Metalas	W (eV)	W (10^{-19} džaulių)
Natris	2,28	3,65
Aliuminis	4,08	6,53
Varis	4,7	7,52
Cinkas	4,31	6,9
Sidabras	4,73	7,57
Platina	6,35	10,2
Švinas	4,14	6,62
Geležis	4,5	7,2
Kalis	1,81	2,9

■ Žr. 9 klausimą.

?

B Pasinaudokite 17.6b) pav. ir nustatykite:

a) Pagal išlaisvinimo darbą – tiriamą metalą.

b) Planko konstantos vertę.

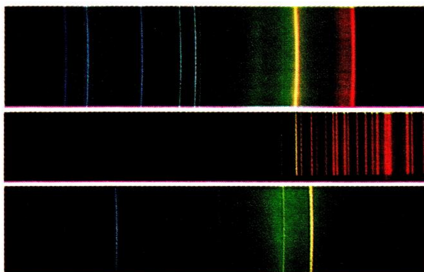
Atomų tyrimas alfa dalelėmis

Pirmiausia šis metodas buvo panaudotas 1909 m. atomams tirti. Alfa dalelės, išspinduliuotos iš radioaktyvaus šaltinio, buvo nukreipiamos į ploną metalo atomų sluoksnį; aprašymą rasite vėliau, kai kalbėsime apie Geigerio ir Marsdeno eksperimentą. Nors dauguma alfa dalelių praskriedavo pro sluoksnį beveik nepakeitusios judėjimo krypties, viena kita jų eksperimento metu atšokdavo į šalį, o tai reiškė, kad jos tame sluoksnyje atsimušdavo į kažką labai mažą, bet masyvų. Atsimušus į elektronus, kurių neabejotinai buvo atomuose, taip atsitikti negalėjo, nes alfa dalelės masė yra maždaug 7000 kartų didesnė už elektrono masę. Išstudijavęs šių eksperimentų rezultatus, E. Rezerfordas (*Rutherford*) 1911 m. suprato, kad atomą sudaro masyvus teigiamo krūvio branduolys, apsuptas neigiamo krūvio elektronų, kurie skrieja apie branduolį, panašiai kaip planetos apie Saulę. Deja, pagal klasikinės fizikos dėsnius toks atomas negali būti stabilus, nes branduolys traukia elektroną, kuris spinduliuodamas energiją praranda greitį ir galų gale dėl tos traukos turėtų nukristi ant branduolio paviršiaus ir visiškai suardyti atomą.

Žr. 10 klausimą.

Modelį 1913 m. „išgelbėjo" danų fizikas N. Boras (*Niels Bohr*), pasitelkęs naująsias energijos kvantavimo idėjas, teigiančias, kad elektronas atome negali turėti bet kokios energijos, o tik „leistinas" kvantuotas jos vertes, atitinkančias tam tikras judėjimo orbitas. Taigi kvantinė idėja „uždraudė" elektronui atome palaipsniui prarasti energiją ir nukristi ant branduolio. Elektronai tokiu atveju gali judėti tik tomis apibrėžtų energijų orbitomis, o peršokdami iš vienos į kitą prarasti arba išspinduliuoti tik tam tikras apibrėžtas energijos vertes – jos kvantus.

Idėja atrodė labai neįtikėtina, tačiau Boras ją pagrindė skaičiavimais, kiek energijos atomas galėtų sugerti ar spinduliuoti, ir susiejo tai su to atomo spinduliuojamų šviesos kvantų energija.



17.7 pav. **Linijinis spektras: viršuje – helio, centre – neono, apačioje – gyvsidabrio**

Boro teorija tik teigė, kad elektronas negali nukristi ant branduolio, tačiau negalėjo paaiškinti, kodėl; tai padarė dar modernesnė kvantinė teorija (žr. 39 p.). „Orbitalė" yra terminas, kurį chemikai dažnai vartoja norėdami nusakyti elektrono orbitos atome neapibrėžtumą.

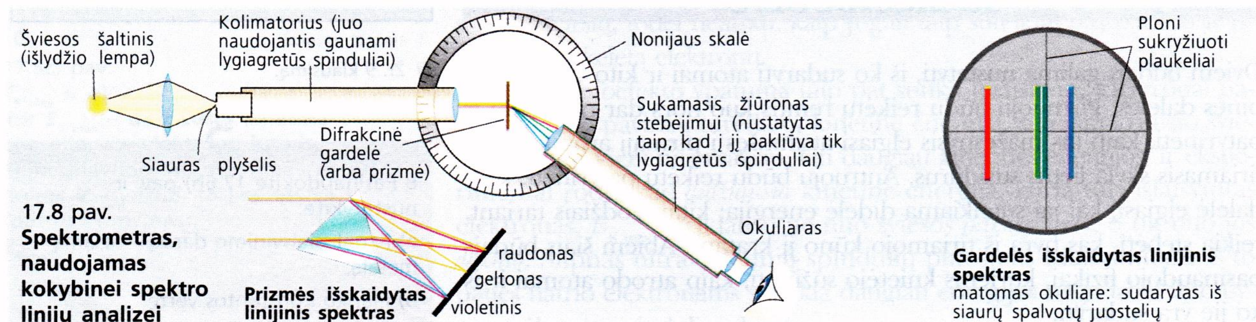
Linijiniai spektrai

Spektras, kurį spinduliuoja karštasis kūnas, yra ištisinis, kadangi bet kuriame medžiagos pavyzdėlyje yra labai daug įvairių osciliatorių, taigi spinduliuojami praktiškai visų spektro dažnių kvantai.

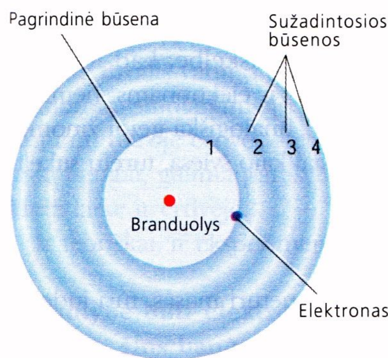
Tačiau egzistuoja ir diskretieji, t. y. **linijiniai spektrai** – paslaptingi spinduliuotės dažniai, kuriuos spinduliuoja *grynieji* elementai, pakėlus jų temperatūrą arba kaip nors kitaip juos „sužadinus". Linijinių spektrų pavyzdžiai pateikti 17.7 pav. ir 16.32 pav. Stebimos linijos yra gautos apšvietus nurodytų elementų pavyzdėlį. Prietaisas, kurį naudojant galima šias linijas sužadinti ir stebėti, pavaizduotas 17.8 pav.

Kiekvienas elementas turi skirtingą, tik jam būdingą, spektrą. Paprasčiausio atomo – vandenilio – spektras turi tik keturias matomas linijas (žr. 22 p.) ir daug nematomų infraraudonojoje ir ultravioletinėje srityse.

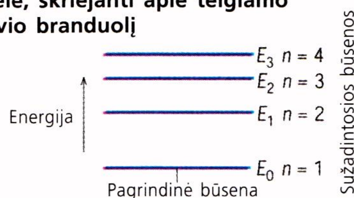
Žr. 11 klausimą.



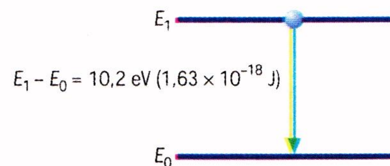
17.8 pav. **Spektrometras, naudojamas kokybinei spektro linijų analizei**



17.9a) pav. **Pagal ankstesnįjį vandenilio atomo modelį (vadinamą Rezerfordo ir Boro modeliu) elektronas buvo traktuojamas kaip dalelė, skriejanti apie teigiamo krūvio branduolį**



17.9b) pav. **Energijos lygmenų schema, atitinkanti Rezerfordo ir Boro modelį**



17.10 pav. **Vandenilio atomas išspinduliuoja $1{,}63\times10^{-18}$ J energijos fotoną, kai elektronas peršoka iš pirmosios sužadintosios į pagrindinę būseną**

N. Boras sugebėjo rasti būdą, kaip paaiškinti šį spektrą ir suskaičiuoti tų linijų bangų ilgius.

Elektronas vandenilio atome gali būti tik tam tikruose energijos lygmenyse. Normaliomis sąlygomis jis užima žemiausiąjį lygmenį. Suteikus tokiam atomui kiek energijos, ją sugėręs elektronas gali peršokti į tolimesnį nuo branduolio lygmenį. Toks *sužadintasis* atomas yra nestabilus, ir elektronas greitai sugrįžta į normalią, nesužadintąją, būseną. Šio šuolio metu jis ir išspinduliuoja elektromagnetinio spinduliavimo kvantą. Šis vyksmas parodytas 17.9 pav., kuriame pateiktas paprastas (ankstesnysis) vandenilio atomo modelis ir N. Boro **energijos lygmenų schema.**

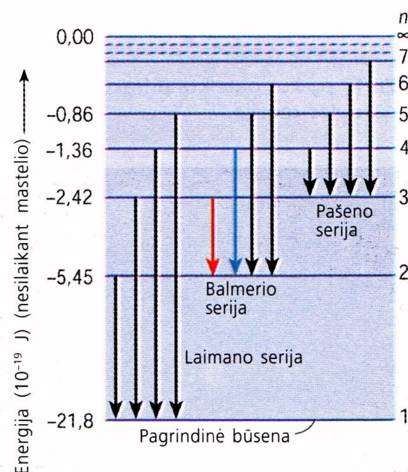
Kad elektronas peršoktų iš lygmens 1(E_0) į lygmenį 2(E_1) (17.10 pav.), vandenilio atomui reikia suteikti 10,2 eV ($1{,}63\times10^{-18}$ J) energiją. Elektronas lygmenyje 2 yra nestabilus; jis greitai sugrįžta į lygmenį 1. Šio šuolio metu atomas išspinduliuoja fotoną, kurio energija lygi šių lygmenų energijų skirtumui, t. y. tiems patiems 10,2 eV. Pagal Planko formulę

$$\Delta E = E_1 - E_0 = hf$$

galima apskaičiuoti šio kvanto dažnį:

$$f = \frac{1{,}63\times10^{-18}}{6{,}63\times10^{-34}} = 2{,}46\times10^{15}\ \text{Hz}$$

Tai vandenilio atomo spektro linijos, esančios ultravioletinių spindulių srityje, dažnis. Atitinkamas bangos ilgis yra lygus 122 nm.



17.11 pav. **Vandenilio atomo spektras sudarytas iš įvairių linijų sekų. Kiekviena seka vadinama vardu mokslininko, kuris pirmasis ją pastebėjo ir ištyrė. Rodyklės žymi šuolius, vykstančius iš aukštesniųjų sužadintų būsenų (energijos lygmenų) į žemesniąsias. Spektro linijų seriją žymi rodyklės, užsibaigiančios tame pačiame lygmenyje**

Jonizacija

Jei atomui suteikiamos energijos pakanka, kad išorinis, toliausiai nuo branduolio esantis, elektronas išlėktų iš atomo, tai toks atomas laikomas **jonizuotu.** Energijos vertės, nurodytos 17.11 pav., yra skaičiuojamos nuo to lygmens, kai elektronas yra nutolęs nuo branduolio, t. y. kai atomas jau yra jonizuotas. Energija, reikalinga vandenilio atomui jonizuoti, lygi $2{,}18\times10^{-18}$ J (13,6 eV).

Kvantinė teorija sėkmingai *išaiškino* paprastą Rezerfordo modelį ir vandenilio spektro linijas, taip pat *nustatė* spektro linijų bangų ilgius, todėl ji įsitvirtino šiuolaikinėje fizikoje.

Žr. 12 klausimą.

4 ELEKTRONAI-BANGOS

„1923 metais aš pagaliau suvokiau, kad 1905 metais Einšteino paskelbta idėja gali būti apibendrinta visoms materialioms dalelėms, taip pat ir elektronams“.

Luji de Broilis (*Louis de Broglie*), mokslų daktaro tezės, 1924 m.

Neigiamos potencinės energijos sąvoka buvo aptarta 3 skyriuje, kai kalbėjome apie gravitacinį lauką ir Niutono Visatą.

Luji de Broilis (1892–1987) pirmiausia studijavo istoriją ir tik po to – fiziką. Filosofijos mokslų daktaro tezėse jis paskelbė, kad formulė $E = hf$ gali būti pritaikoma ne tik fotonams, bet ir elektronams. Jiems irgi turinti egzistuoti „įsivaizduojamoji banga", analogiška gerai žinomai fotonų bangai. Jei taip, tai elektronai, panašiai kaip šviesa, turėtų sukelti difrakcijos reiškinį.

Elektrono bangos ilgis

Reliatyvumo teorija teigia, kad fotonas, nors neturi masės, turi judesio kiekį p, susijusį su bangos ilgiu λ:

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

A Žr. 25 skyrių „Erdvėlaikio fizika"

Dalelės $\Delta E_K = v\Delta p$

$\Delta E = c\Delta p$

Taigi

$E = pc$

Tačiau $E = hf = hc/\lambda$,

todėl $\lambda = hc/E = h/p$.

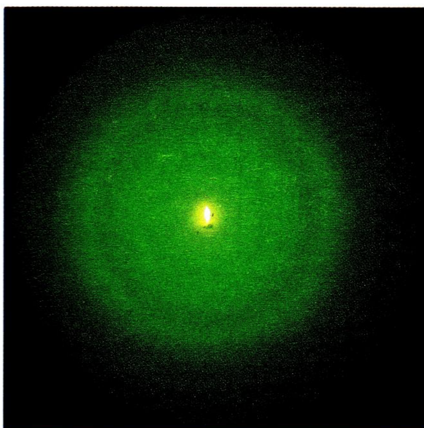
Panašiai kaip fotonas, ir elektronas galėtų turėti bangos ilgį, išreiškiamą formule:

$$\lambda = \frac{h}{mv},$$

kur m yra elektrono masė, o v – jo greitis. Vadinasi, elektrono bangos ilgis priklauso nuo jo greičio: kuo greičiau juda elektronas, tuo trumpesnis jo bangos ilgis.

Žr. 17 p., kur pateikta difrakcinės gardelės teorija.

1925 m. buvo užfiksuota ir elektronų difrakcija. K. Devisonas (*C. J. Davisson*) ją aptiko, į nikelio plokštelę nukreipęs mažos energijos (54 eV) elektronų srautą. Labai švariame metalo ar kitokio kristalinio kietojo kūno paviršiuje aiškiai matyti nikelio atomų pasiskirstymo raštas. Atsispindėję nuo paviršiaus elektronai erdvėje pasiskirsto tam tikru būdu ir sudaro difrakcinį raštą. Naudojantis difrakcinės gardelės teorija ($n\lambda = d \sin\theta$) galima pagal šiuos raštus nustatyti elektrono bangos ilgį ir patvirtinti de Broilio teoriją.



17.12 pav. **Difrakcijos žiedai, stebimi įprastiniame laboratoriniame difrakcijos prietaise**

17.12 pav. parodyti elektronų difrakcijos raštai, gaunami elektronų pluošteliui atsimušus į gardelę, kurią sudaro grafito kristale taisyklingai išsidėstę anglies atomai.

Nesunku pastebėti, kad šie raštai yra visiškai tokie pat kaip raštai, gaunami gardele sklaidant šviesos spindulius, nors atstumai tarp atomų sklaidančioje gardelėje ir turi būti gerokai mažesni. Taip yra todėl, kad elektronų bangos ilgis yra daug mažesnis už regimosios šviesos bangos ilgį. Šį bangos ilgio santykį galime apskaičiuoti.

Žr. 13–16 klausimus. ■

PAVYZDYS

K Apskaičiuokite elektrono, pagreitinto lauke, kurio potencialų skirtumas (V) lygus 8 kV (maždaug toks yra televizoriaus kineskope). Elektrono masė m lygi $9{,}11\times10^{-31}$ kg, jo krūvis e lygus $1{,}60\times10^{-19}$ C.

A Kinetinė energija, kurią įgyja elektronas, lygi jo potencinės energijos pokyčiui, todėl

$$\frac{1}{2}mv^2 = eV$$

ir

$$v = \sqrt{\frac{2eV}{m}} = \sqrt{\frac{2\times1{,}6\times10^{-19}\times8000}{9{,}11\times10^{-31}}} = 5{,}30\times10^{7}\,\mathrm{m\cdot s^{-1}}$$

(Tai sudaro apie 18% šviesos greičio, bet reliatyvistinius efektus mes kol kas ignoruojame!)

Elektrono bangos ilgis:

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{6{,}63\times10^{-34}}{9{,}11\times10^{-31}\times5{,}30\times10^{7}} = 1{,}37\times10^{-11}\,\mathrm{m}$$

Palyginkite jį su šviesos bangos ilgiu, kuris yra 10^{-7} m eilės.

Ką iš tikrųjų reiškia „elektroninė banga"?

Pats de Broilis vadino elektronines bangas įsivaizduojamomis, t. y. virtualiomis. Šiuolaikinis jų įvaizdis yra susijęs su **tikimybe** būti elektronui tam tikroje erdvės vietoje. Pasirodo, elektronui, kaip ir bet kokiai kitai bangai, galima parašyti *banginę lygtį* ir įsitikinti, kad jų amplitudė kinta laike ir erdvėje.

Ir teoriškai, ir eksperimentiškai:

Tikimybė būti elektronui kuriame nors taške yra proporcinga šios bangos amplitudės tame taške kvadratui.

Amplitudę galima rasti iš gana sudėtingos **Šrėdingerio banginės lygties**, kurią E. Šrėdingeris (*Erwin Schroedinger*, Austrija, 1887–1961) paskelbė 1926 m. Ją aptarsime 38–39 p.

Dabar jau žinome, kodėl atomai nesuyra!

De Broilio idėja buvo raktas įminti paskutinę atomų paslaptį – kodėl jie savaime nesuyra. Paprastas atsakymas būtų toks:

- Elektronas yra banga, kurios ilgis mažėja didėjant energijai.
- Bandant suspausti šią bangą (elektroną link branduolio), ji labai sutrumpėja.
- Kai bangos ilgis tampa palyginamas su branduolio matmenimis, elektrono energija išauga tiek, kad branduolio traukos jau nepakanka elektronui išlaikyti.

Matematiškai šis reiškinys aprašytas 39 p.

17.13 pav. pavaizduota vandenilio atomo elektroninė banga, taip pat tikimybių pasiskirstymo funkcija, proporcinga elektrono bangos kvadratui.

Šrėdingerio banginės lygties sprendiniai egzistuoja esant tik tam tikroms elektrono pilnutinės energijos reikšmėms: turėkite omenyje, kad energija nusako judesio kiekį, o pastarasis – bangos ilgį. Akivaizdu, kad bet koks turintis fizikinę prasmę šios lygties sprendinys turi būti lygus nuliui bent kiek didesniame nuotolyje nuo branduolio, priešingu atveju elektronas turėtų baigtinę tikimybę visiškai ištrūkti iš atomo ir atomas vėl nebūtų stabilus.

Elektronų tuneliavimas

Viena netikėčiausių bangų teorijos išvadų buvo ta, kad banginė funkcija tolstant nuo atomo branduolio nevirsta nuliu. Šis reiškinys pagal klasikinę teoriją visiškai neįmanomas, nes atomo pakraščiuose elektrono kinetinė energija lygi nuliui, ir už tų ribų atsidūrusio elektrono kinetinė energija jau būtų neigiama, o taip negali būti. Kvantinėje bangų teorijoje tai leistina, taigi elektronas nepažeisdamas jokių taisyklių gali egzistuoti ir už atomo ribų. Todėl ir pasireiškia **tuneliavimo reiškinys**, įgalinantis tuneliniu mikroskopu gauti paveikslėlio 28 p. vaizdą.

17.13 pav. Elektroninės bangos deformacija. Suspaudus bangą, jos ilgis sumažėja, o judesio kiekis ir energija išauga.

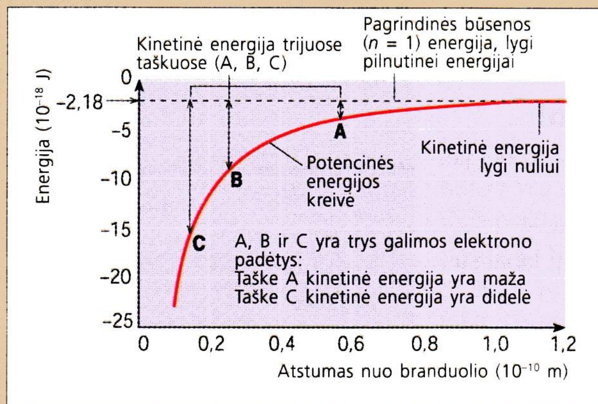
Energija yra proporcinga $1/\lambda^2$, taigi jos padidėjimas yra žymus.

Netgi branduolio traukos jėga nėra pakankamai stipri išlaikyti elektroną; įgauto greičio pakanka atitrūkti nuo branduolio.

■ Žr. 17 klausimą.

Požiūris į realų vandenilio atomą – elektronų debesėliai ir Šrėdingerio banginė lygtis

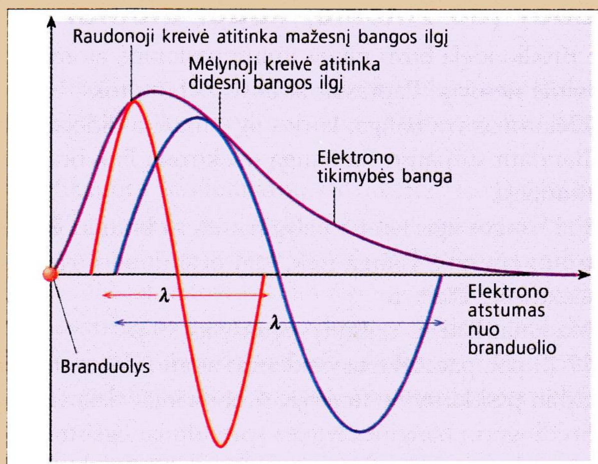
Elektrono ir protono sistemos, sudarančios vandenilio atomą, potencinės energijos priklausomybė nuo atstumo tarp šių dalelių pavaizduota 17.15 pav. Atkreipkite dėmesį – potencinė energija yra neigiama. Elektronui artėjant prie atomo ribos, jo kinetinė energija mažėja ir artėja prie nulio. Kuo arčiau branduolio elektronas, tuo didesnis jo greitis, nes mažesnė potencinė energija. Pilnutinė sistemos energija išlieka pastovi, lygi $2{,}18\times10^{-18}$ J (13,6 eV).



17.15 pav. Vandenilio atomo „potencialinė duobė". Elektronui priartėjus prie branduolio, jo potencinė energija mažėja, o kinetinė didėja

Taigi jau nebegalime, kaip iki šiol, manyti, kad elektronas yra labai paprasta dalelė. Pagal bangų teoriją galima tik nusakyti, jog elektronas yra kažkur branduolio aplinkoje, ir pateikti tikimybę būti jam tam tikru *atstumu* nuo branduolio. Elektrono buvimo tam tikroje *vietoje tikimybė* lygi elektroninės bangos amplitudės kvadratui tame taške. Koks šios elektroninės bangos pavidalas?

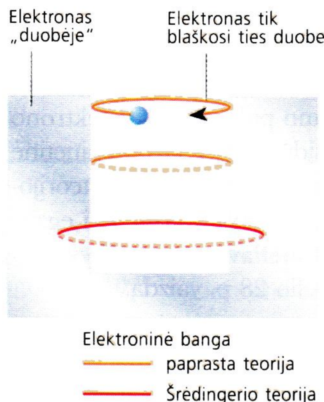
Žinome, kad ji priklauso nuo elektrono judesio kiekio, kadangi $p = h/\lambda$ (de Broilio formulė). Elektronui priartėjus prie branduolio, jo greitis, taigi ir judesio kiekis, padidėja, o bangos ilgis sumažėja. Galimas tokios bangos vandenilio atome pavidalas pavaizduotas 17.16 pav. Nesunku pastebėti, kad bangos forma arčiau branduolio, kur mažesnis bangos ilgis, yra statesnė. Mes negalime pavaizduoti visos bangos, tačiau raudona ir mėlyna kreivės maždaug atitinka bangų ilgius, artimus tikrajai bangai kuriame nors taške.

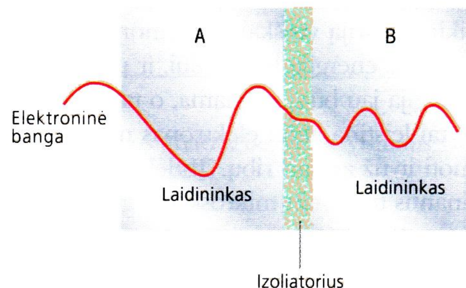


17.16 pav. Elektroninė banga yra tokio pavidalo, kad įvairiuose taškuose ją galima pavaizduoti sinusoidėmis, kurių ilgis palaipsniui mažėja, elektronui artėjant prie branduolio. Trumpesnių bangų amplitudė greičiau išauga, bet jos greičiau ir nuslopsta, sumažėjus iki nulio atstumui nuo branduolio

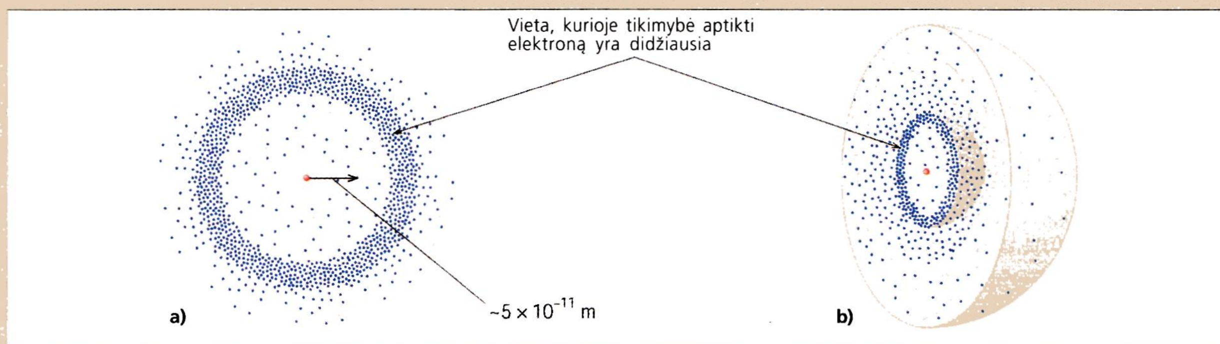
17.14a) pav. Tikimybė, kad elektronas yra už potencialinės duobės ribų, nelygi nuliui

17.14b) pav. Elektronas gali „tuneliuoti" iš A į B, nes tikimybės kreivė, pratęsta pro ploną izoliatoriaus sluoksnelį, netampa lygi nuliui. Daugiau apie tai rašoma 70 p.





Taigi elektrono banginė prigimtis – tai ne vien kažkoks modelis, naudojamas atomų savybėms paaiškinti. Elektronine banga galima paaiškinti ir tokius reiškinius, kaip superlaidumas, šiuo metu praktiškai taikomas gaminti mikroelektronikos prietaisams, taip pat paaiškinti cheminius ryšius ir molekulių pavidalą.



17.17a) pav. Elektronas skrieja taip greitai, kad „stebėti" galima tik judančio elektrono buvimo kur nors tikimybės tankio „debesėlį", kuris yra tankiausias maždaug 0,5×10⁻¹⁰ m atstumu nuo branduolio

17.17b) pav. Iš tiesų elektronas juda trimatėje erdvėje

Tikimybės bangos, lygios elektroninei bangai kvadratu, pavaizduotos 17.18 pav. 17.17a) pav. atomas pavaizduotas kaip paprastas dvimatis darinys, tačiau iš tiesų jis yra trimatis, ir 17.17b) pav. labiau atspindi tikrovę. Chemikai linkę vaizduoti erdvę, kurioje juda elektronas, kaip debesėlį, ir todėl atome apie branduolį piešiamos orbitalės, rodančios sritis, kuriose tikimybė rasti elektroną yra didžiausia.

Šrėdingerio banginė lygtis

Išsprendus bangos, tarkime, bangos stygoje, lygtį galima nustatyti, kaip tos bangos amplitudė kinta erdvėje ir laike, t. y. galima aprašyti bangos kitimą išilgai stygos įvairiais laiko momentais. Bangos, plintančios stygoje, lygtis, kaip pateikta 1-os d. 129 p., yra tokia:

$$y = A\cos\left(\frac{\omega x}{v}\right)$$

kur y yra jos amplitudė (banga juda išilgai stygos greičiu v); y priklauso nuo ω ($\omega = 2\pi f$). Šios bangos amplitudė didžiausia taške $x = 0$. Šiai bangai gali būti užrašyta ir diferencialinė lygtis:

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{1}{v^2}\frac{d^2y}{dt^2}$$

Elektroninėms bangoms greitis v gali būti susietas su judesio kiekiu, taigi ir su jų kinetine energija. Šrėdingeris, atlikęs šią transformaciją, gavo banginę lygtį, kuri paprastai pateikiama šitokio pavidalo:

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = -\frac{8\pi^2 m}{h^2}(E - v)\psi$$

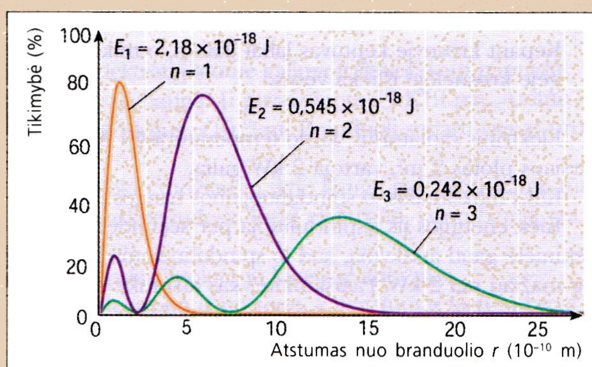
Vietoj ankstesniosios y šioje lygtyje įprasta naudoti graikišką raidę ψ, E yra pilnutinė elektrono energija, o V – jo potencinė energija taške x. Ši lygtis yra šiek tiek supaprastinta; ji nepriklauso nuo laiko ir yra vienmatė. Naudojant ją vandenilio atomui aprašyti, reikia x įsivaizduoti kaip r, t. y. kaip elektrono atstumą nuo branduolio, ir pasinaudoti tuo, kad V priklauso nuo r:

$$V = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r}$$

Tada
$$\frac{d^2\psi}{dr^2} = -\frac{8\pi^2 m}{h^2}\left(E - \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r}\right)\psi$$

17.18 pav. oranžinė kreivė vaizduoja šios funkcijos kvadrato priklausomybę nuo r, kai elektrono pilnutinė energija $E_1 = -2{,}18\times10^{-18}$ J. Tai visa atomo energija jo pagrindinėje būsenoje, kur kvantinis skaičius n lygus 1. Kreivė greitai priartėja prie nulio, ir tai reiškia, kad šis elektronas „įkalintas" atome. Iš tiesų išsprendus lygtį nesunku įsitikinti, kad jos sprendinių, atitinkančių išliekančius atome elektronus, energijos E gali būti lygios tik E_1/n^2. Tai reiškia, kad galioja Balmerio eksperimentiškai nustatytas sąryšis vandenilio atomo energijos lygmenims.

Kreivės keletui kitų energijos verčių pateiktos tame pačiame paveiksle. Kiekvienu atveju kreivės maksimumas rodo vietą, kur tikimybė būti sužadintam elektronui didžiausia; maždaug ten yra ir jo „orbitalė".



17.18 pav. Tikimybių kreivės vandenilio atomo elektronui, esančiam trijų galimų energijų būsenose

Žr. 18 klausimą.

SANTRAUKA

Išnagrinėję šį skyrių jūs turėtumėte:

- Suvokti juodojo kūno spinduliavimo prigimtį.
- Suprasti Vyno ir Stefano dėsnius, siejančius juodojo kūno spinduliavimo bangų ilgius, temperatūrą ir intensyvumą.
- Žinoti, kaip turi būti pakeista klasikinė teorija, kad paaiškintų eksperimentų rezultatus.
- Suprasti, kaip Planko kvantų teorija paaiškino juodojo kūno spinduliavimą.
- Suvokti fotoelektrinio reiškinio esmę ir kaip Einšteinas paaiškino šį keistą reiškinį, naudodamasis kvantų teorija ir fotono sąvoka.
- Žinoti, kad Rezerfordo atomo branduolinį modelį galima paaiškinti tik remiantis kvantų teorija.
- Mokėti paaiškinti, kaip kvantinė teorija aprašo reiškinį, jog sužadinti atomai spinduliuoja šviesą, ir suvokti energijos lygmenų sąvoką, paaiškinančią vandenilio atomo spektrą.
- Suprasti, ką reiškia elektrono banga, kurios de Broilio bangos ilgis lygus $\lambda = h/p$.
- Žinoti, kaip banginės elektronų savybės, kuriomis remiantis galima nustatyti jų radimo atome tikimybes, labiau padeda suprasti atomą negu įsivaizduojant elektronus kaip įprastines daleles.
- Susipažinti su Šrėdingerio lygtimi ir jos panaudojimu aprašant vandenilio atomą.

KLAUSIMAI

Duomenys, kurie padės jums rasti atsakymus į kai kuriuos pateiktus klausimus.

Planko konstanta h: $6{,}6 \times 10^{-34}$ J · s
Elektrono masė m: $9{,}1 \times 10^{-31}$ kg
Šviesos greitis c: $3{,}0 \times 10^{8}$ m · s^{-1}
Protono/elektrono krūvis e: $\pm 1{,}6 \times 10^{-19}$ C
Vyno konstanta išraiškoje $\lambda_{max}T$ = const: $2{,}9 \times 10^{-3}$ m · K
Stefano konstanta: $5{,}7 \times 10^{-8}$ W · m^{-2} · K^{-4}

1 Trumpai paaiškinkite tokius reiškinius:
a) Kaitinamo metalo spalva kinta.
b) Kepant krosnyje keptuvas labai įkaista, o mikrobangėje krosnelėje išlieka vėsus.

2 Elektrinis radiatorius, kurio temperatūra 40 °C ir paviršiaus plotas 2 m^2, vartoja 2 kW galią.
a) Koks maksimalus jo spinduliuojamos bangos ilgis?
b) Kiek energijos jis išspinduliuoja per sekundę?
Turėtumėte gauti atsakymą, kad jo spinduliuojama galia yra daug mažiau nei 2 kW. Paaiškinkite, kas atsitinka su visa kita energija?

3
a) Viena iš ryškiausių matomų žvaigždžių yra Vega. Ji spinduliuoja šviesą, kurios didžiausias bangos ilgis yra 240 nm. Naudodamiesi Vyno dėsniu, nustatykite žvaigždės paviršiaus temperatūrą.
b) Koks būtų didžiausias milžiniškos žvaigždės spinduliuojamos bangos ilgis, jei jos paviršiaus temperatūra lygi 3000 K?

4 Akis yra jautriausia šviesai, kurios bangos ilgis lygus 560 nm. Kokios temperatūros juodojo kūno spinduliavimo maksimumas atitinka šį bangos ilgį?

5 Kas tai yra *ultravioletinė katastrofa*? Trumpai atsakykite, kaip buvo jos išvengta.

6
a) Raskite energiją fotono, kurio bangos ilgis lygus: **(i)** 200 nm, **(ii)** 600 nm, **(iii)** 2 mm, **(iv)** 10 mm.
b) Kurioje elektromagnetinio spinduliavimo spektro vietoje yra kiekvienas šių fotonų?

7 Nustatykite, kiek regimos šviesos fotonų per sekundę išspinduliuoja paprasta 60 W galios elektrinė lemputė. Jos efektyvumas vos 2 procentai – visa kita energijos dalis išsiskiria kaip šiluma.

8 Net labai intensyvi raudonoji šviesa negali išplėšti elektronų iš švaraus cinko metalo paviršiaus. Ir visai silpnas ultravioletinis spinduliavimas tą reiškinį gali sukelti. Kodėl taip atsitinka?

9 Lentelėje pateiktas išlaisvinimo darbas trims skirtingiems metalams:

	eV	J·10^{-19}
Kalis	1,81	2,9
Natris	2,28	3,65
Cinkas	4,31	6,9

a) Kuriame metale galima sukelti fotoelektrinį efektą mažiausio dažnio spinduliuote?
b) Raskite mažiausią (slenkstinį) dažnį, kurį pasiekus elektronai jau išlėks iš cinko.
c) Kurios natrio atomų savybės rodo, kad jo atomai lengvai netenka elektronų?
d) 500 nm bangos ilgio monochromatinė šviesa krinta į švarų natrio paviršių. Kokia didžiausia išspinduliuotų elektronų kinetinė energija?

10 Paprastas atomo modelis yra toks: mažas masyvus branduolys, apsuptas orbitomis judančių elektronų.
a) Kas šiame modelyje išlaiko elektronus jų orbitose?
b) Kodėl šis modelis prieštarauja klasikinei teorijai, teigiančiai, kad judantys su pagreičiu krūviai turi spinduliuoti elektromagnetines bangas?
c) Paaiškinkite, kodėl modelis, kuriame elektronai elgiasi kaip bangos, išvengia šio prieštaringumo.

11 Elementus galima atskirti pagal jų linijinius spektrus.
a) Aprašykite eksperimentą, įgalinantį stebėti elemento spektrą ir matuoti jo spektro linijų bangų ilgius.
b) Trumpai paaiškinkite fizikines priežastis žinomo fakto, kad skirtingų elementų spektrai yra skirtingi.

12 Lentelėje pateikti vandenilio atomo Laimano serijos pirmųjų keturių linijų bangų ilgiai:

Bangos ilgis (nm)	95	97,3	102,6	121,6

a) Šios linijos atsiranda pereinant atomui iš keturių lygmenų su didesne sužadinimo energija į lygmenį, kurio energija yra $-2{,}18\times10^{-18}$ J. Pavaizduokite energijos lygmenų schemą, kuria galėtumėte paaiškinti šių linijų atsiradimą. Raskite ryšį tarp šių linijų energijos ir bangos ilgio. Pažymėkite gautos schemos lygmenis skaičiais nuo $n = 1$ iki $n = 5$; pradėkite nuo žemiausiojo lygmens, kurio $n = 1$.
b) Remdamiesi lygtimi $E = hf$ apskaičiuokite keturių aukštesniųjų lygmenų energijas. Nubrėžkite grafiką, iš kurio įsitikintumėte, jog aukštesnieji lygmenys surišti su žemiausiuoju šitokia priklausomybe: $E_n = E_1/n^2$.

13 Palyginkite šviesos (žr. 16 skyrių – **Elektromagnetinė spinduliuotė**) ir elektronų difrakciją.
a) Difrakcine gardele galima gauti baltos šviesos spektrą. Kurie spinduliai – mėlynieji ar raudonieji – difraguoja didesniu kampu?
b) Difrakcinės gardelės konstanta d lygi 5×10^{-6} m. Kokiu kampu stebimas pirmasis maksimumas, sukeltas šviesos, kurios bangos ilgis yra $5{,}0\times10^{-7}$ m? (Pasinaudokite sąryšiu $n\lambda = d\,\sin\theta$).
c) Moksleivis nori naudodamasis difrakcine gardele stebėti elektronų difrakciją. Jis įdeda gardelę į elektroninį vamzdį ir nukreipia į ją elektronų pluoštą. Praėjęs gardelę pluoštas registruojamas elektroninio vamzdžio ekrane. Tokiu įtaisu galima su pakankamu tikslumu išmatuoti 2 laipsnių difrakcijos kampą.
i) Ekrane užfiksuojami tik į jį atsitrenkiantys elektronai, pagreitinti 2 kV potencialų skirtumo. Koks yra šių elektronų bangos ilgis?
iii) Jei gardelė gali sukelti elektronų difrakciją, tai koks kampas atitiks pirmosios eilės maksimumą šiems elektronams? Ar įmanomas toks eksperimentas?

(1 eV = $1{,}6\times10^{-19}$ J, elektronų judesio kiekis $p = h/\lambda$, kinetinė energija $E_K = p^2/2m$).

14 Toliau pratęskime 13 uždavinio nagrinėjimą: elektronų difrakciją paprasčiau stebėti, kai elektronų pluoštas krinta į kristalą, kurio atomų sekos veikia kaip gardelė. Šiam tikslui galima pasinaudoti grafitu, kuriame atstumai tarp gretimų atomų yra lygūs $1{,}23\times10^{-10}$ m.
a) Elektronų pluoštas difragavo grafite taip, kad antrosios eilės maksimumas buvo stebimas 0,167 radiano kampu. Naudodamiesi gardelės formule, raskite tų elektronų bangos ilgį.
b) Elektronai pagreitinti 5000 V potencialų skirtumu. Raskite jų kinetinę energiją ir judesio kiekį.
Naudodamiesi sąryšiu $p = h/\lambda$, raskite Planko konstantos h vertę.

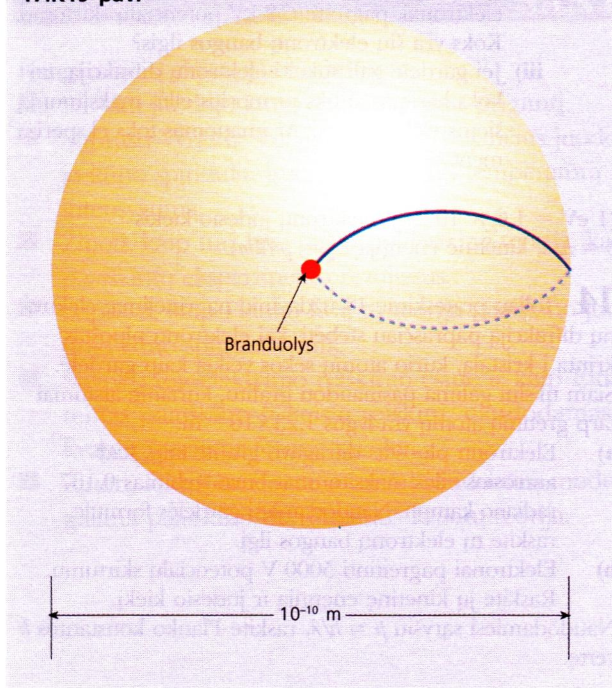
15 Laisvieji elektronai, metaliniais laidininkais perduodantys elektros srovę, tarp susidūrimų su metalo atomais turi įgauti greitį, ne mažesnį kaip 2×10^6 m/s.
a) Įsitikinkite, kad tokių elektronų bangų ilgiai yra maždaug keturis kartus didesni už atomų matmenis (atomo skersmuo – apie 10^{-10} m).
b) Šiuolaikinai puslaidininkiniai lustai gali būti sudaryti iš sluoksnių, kurių storis prilygsta vos keletui atomų skersmenų. Kokių sunkumų gali dėl to kilti?

16 Neutrono masė lygi $1{,}67\times10^{-27}$ kg. Lėtieji (šiluminiai) neutronai, naudojami atominėse elektrinėse, sukelia urano branduolio skilimą. Jų vidutinė kinetinė energija lygi 0,04 eV (1 eV lygus $1{,}6\times10^{-19}$ J).
a) Raskite šių neutronų judesio kiekį.
b) Raskite jų de Broilio bangos ilgį.

17 Vieną kartą jonizuotas helio atomas sudarytas iš branduolio, kurio krūvis yra lygus $+2e$, ir elektrono; elektrono krūvis yra $-e$. Ar šis jonas yra didesnis, ar mažesnis už vandenilio atomą?

18 Elektroną atome galima traktuoti kaip paprastą stovinčiąją bangą. Ji pavaizduota 17.K19 pav. Atomo skersmuo lygus $\sim10^{-10}$ m. Branduolį sudaro vienas protonas.
a) Kokio didžiausio ilgio banga gali tilpti šiame tūryje?
b) Raskite judesio kiekį elektrono, kurio banga yra tokio ilgio.
c) Apskaičiuokite jo kinetinę energiją.
d) Elektrono ir protono, kai atstumas tarp jų lygus r, sąveikos potencinė energija yra $E_p = e^2/4\pi\varepsilon_0 r$.

17.K19 pav.



Kokia reikalinga energija, kad elektronas galėtų kiek norint toli nutolti nuo protono?

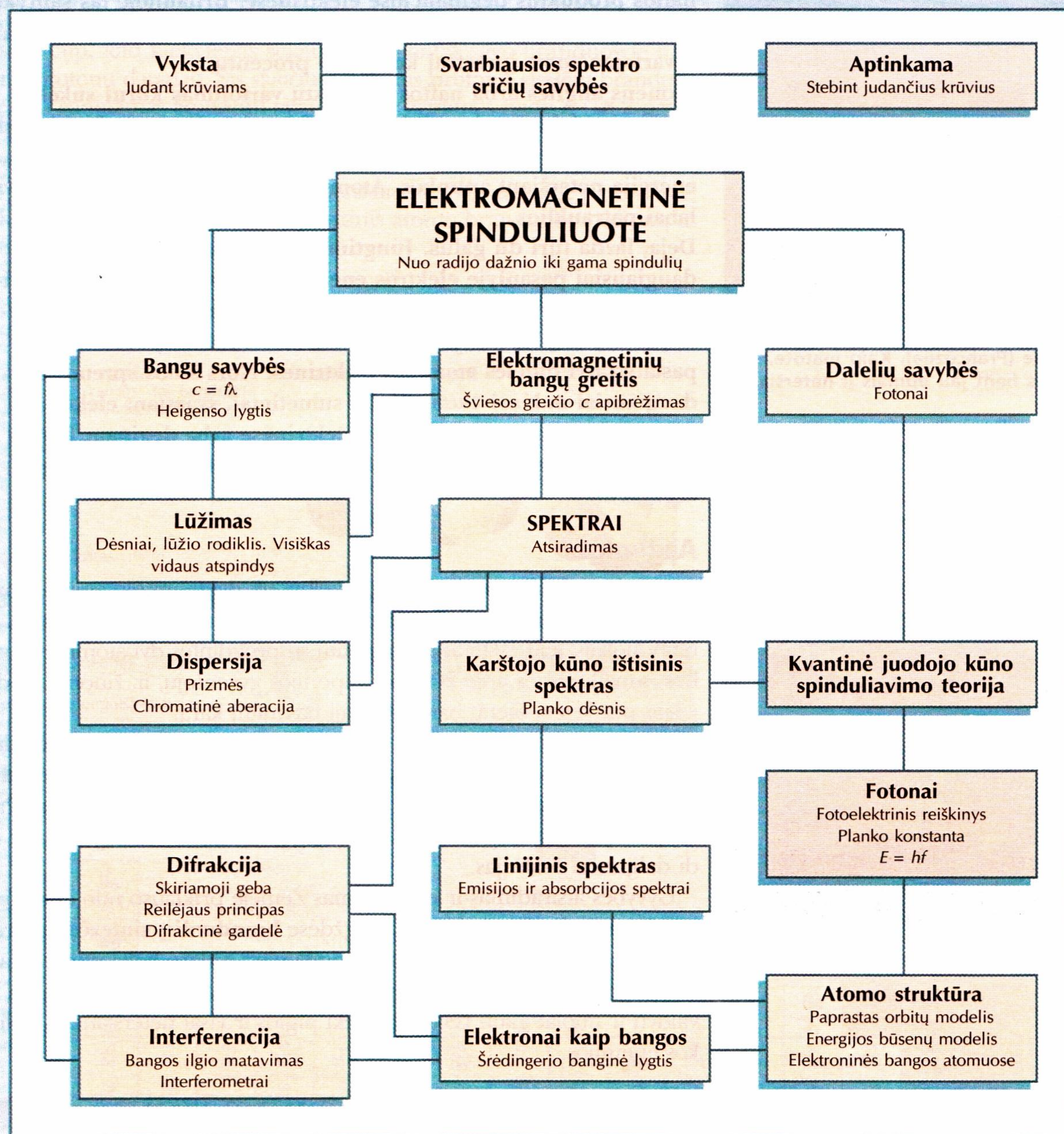
e) Ar elektronas, kurio energiją apskaičiavote **c)** punkte, turi pakankamai kinetinės energijos, kad atitrūktų nuo protono?

f) Tarkime, elektrono bangos ilgis yra toks, kad jis gali būti vieno protono atome, kurio skersmuo 10^{-11} m. Pakartokite anksčiau atliktus veiksmus ir įsitikinkite, ar toks elektrono ir protono derinys gali būti stabilus.

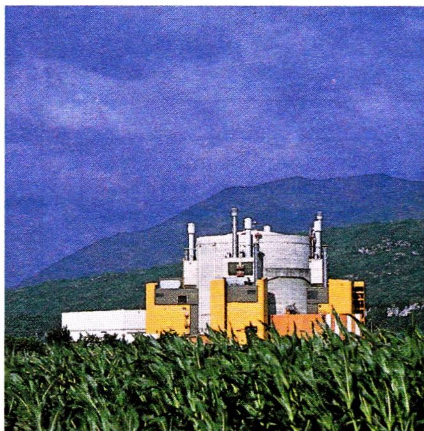
ELEKTROMAGNETINĖ SPINDULIUOTĖ; ATOMAI, SPEKTRAI IR KVANTAI

Šio skyriaus schemoje pateikti svarbiausi teiginiai, išdėstyti **16** ir **17** skyriuose, kurių pavadinimai yra **Elektromagnetinė spinduliuotė** bei **Atomai, spektrai ir kvantai.**

Schema aprėpia pagrindines sąvokas ir lygtis, su kuriomis jūs susipažinote šiuose skyriuose, taip pat jų tarpusavio saitus ir priklausomybes. Naudodamiesi šia schema jūs galite išsiaiškinti, kokią pagrindinę informaciją turėjote įsisavinti studijuodami šią medžiagą. Taip pat pagal šią schemą jūs galite pasitikrinti savo žinias ir išsiaiškinti, kurie klausimai dar ne visiškai aiškūs, kad galėtumėte juos nuodugniau panagrinėti.



18 Atomo branduolys



Viršuje: Creys-Malville atominė elektrinė (Prancūzija). Kaip matote, aplinkos bent jau dūmais ji neteršia.

Apačioje: Drax (Šiaurės Jorkšyras, Anglija) elektrinė, kurui vartojanti akmens anglį. Iš jos aušinimo bokštų kyla garai, išsisklaidantys kaip debesys, tačiau dūmai, kylantys iš centrinio kamino, turi sieros ir azoto oksidų, susidarančių degant angliai ar naftos produktams.



Prancūzija 75 procentus visos elektros energijos pagamina savo atominėse elektrinėse ir tik 12 procentų – akmens anglį arba naftos produktus deginančiose elektrinėse. Britanijoje tas santykis beveik priešingas – atominėms elektrinėms tenka tik 28 procentai, o vartojančioms įprastinį kurą – 70 procentų.

Akmens anglies arba naftos produktų vartojimas kurui sukelia šiltnamio efektą ir visuotinį šilimą. Dūmai teršia atmosferą ir todėl labiausiai išsivysčiusios šalys ieško būdų, kaip gaminti elektros energiją neteršiant aplinkos. Atominės elektrinės šiuo požiūriu yra labai patrauklios.

Deja, lazda turi du galus. Jungtinės Valstijos, kurios pagamina daugiausiai pasaulyje elektros energijos būtent atominėse elektrinėse, 1987 m. priėmė nutarimą daugiau nebestatyti naujų atominių elektrinių. Britanija taip pat atsisakė ketinimų 1995 m. pastatyti dvi dideles atomines elektrines. Nors šiuos sprendimus daugiausiai nulėmė ekonominiai sumetimai, svarstant elektros energijos, gaunamos atominėse elektrinėse arba deginant kurą, privalumus pasitelkiami tiek ekonominiai, tiek ir aplinkosaugos argumentai.

Apžvalga

Atomo branduolio teorija buvo paskelbta tik dvidešimtojo amžiaus pradžioje, tačiau užteko kelių dešimčių metų po pirmosios pažinties su branduoliais, kad 1945-aisiais jau būtų susprogdintos dvi atominės bombos, sunaikinusios apie 200 000 Japonijos gyventojų, ir, žinoma, padėjusios per keletą dienų baigti Antrąjį pasaulinį karą.

Svarbiausias procesas, kurio metu atomų branduoliai išskiria naudingą energiją, yra **branduolių dalijimasis**. Dalytis gali tik kai kurie, labai sunkūs, branduoliai, todėl šis procesas iš tikrųjų retai sutinkamas. Pats **radioaktyvumas** nepasižymi kaip energijos šaltinis, tačiau jis visada lydi dalijimosi reakcijas.

Gyvybės atsiradimas ir egzistavimas Žemėje priklauso nuo energijos, gaminamos Saulėje ir kitose žvaigždėse **branduolių sintezės** reakcijų metu, kai vandenilio branduoliai jungdamiesi sudaro helio atomo branduolį. Žemėje vis dar nesėkmingai mėginama panaudoti šią reakciją, ją valdyti ir nuolat gauti reikiamą kiekį pigios ir visai neteršiančios aplinkos energijos.

1 BRANDUOLĮ TURINTIS ATOMAS

Atomai – tai dažniausiai tuščia erdvė. Mes jau pavaizdavome vandenilio atomą kaip materialų tašką – protoną, apie kurį orbitomis labai greitai skrieja elektronas. Sunkesniuose atomuose elektronų yra daugiau, tačiau jų ir **branduolys** didesnis bei masyvesnis ir, nors užima tik vieną dešitmilijardąją atomo tūrio dalį, jo masė sudaro apie 99,95 procento atomo masės. Taigi atome beveik visą erdvę aplink kompaktišką branduolį užpildo elektronai, kurie juda taip greitai, kad galima įsivaizduoti, jog jie tuo pat metu yra visoje toje erdvėje (žr. 39 p.).

Šiame skyriuje sužinosite, kas dabar žinoma apie atomų branduolius, jų prigimtį ir sandarą, ir paaiškinsime, kodėl kai kurie branduoliai **dalijasi**, skildami į lengvesnius branduolius, o kai kurie yra **radioaktyvūs**.

Branduolio schemos

Atomo branduolys, kuriame sutelkta praktiškai visa jo masė, yra sudarytas iš **nukleonų**. Yra dvi nukleonų rūšys; jų masės šiek tiek skiriasi (18.1 lentelė). Protonas turi elektros krūvį: šis krūvis teigiamas ir prilygsta elektrono krūviui. Jis šiek tiek lengvesnis už savo neutralų, neturintį krūvio partnerį – neutroną.

Periodinėje cheminių elementų lentelėje (18.2 lentelė) elementai išdėstyti taip, kad kiekvienas sekantis elementas savo branduolyje turi vienu protonu daugiau. Šis skaičius, žymintis **protonų skaičių** branduolyje, yra vadinamas **atominiu skaičiumi** ir žymimas raide **Z** (18.2 pav.).

Sudėję branduolio protonų ir neutronų skaičius gauname elemento nukleonų skaičių, vadinamą jo masės skaičiumi ir žymimą raide A. Apie tai, kokia tikroji branduolio masė, perskaitysite 51 puslapyje pateiktame aiškinime. 18.3 pav. parodytas įprastinis atomo branduolio protonų ir masės skaičių žymėjimo būdas.

18.1a) pav. **Šiuolaikinis atomo įvaizdis. Atomas yra tam tikro dydžio, tačiau didžioji jo tūrio dalis yra užpildyta „nelokalizuotų" elektronų, sukuriančių tikimybių debesėlį**

Apie 10^{-14} m skersmens branduolys

Apie 10^{-10} m skersmens elektronų debesėlis

■ Žr. 1 klausimą.

18.1b) pav. **Branduolys yra labai mažas palyginti su atomu. Jei jis būtų žirnelio dydžio, tai atomas būtų tokio dydžio, kaip futbolo aikštė**

Atomo riba

Žirnelio dydžio branduolys

18.2 pav. **Paprasti atomo branduolio modeliai**

A – masės skaičius arba nukleonų skaičius: tai bendras skaičius nukleonų, sudarančių branduolį

Z – protonų skaičius (arba atominis skaičius)

Neutronas

Protonas

Vandenilis A = 1 Z = 1

Helis A = 4 Z = 2

Anglis A = 12 Z = 6

18.3 pav. **Anglies branduolio žymėjimas**

A: masės (nukleonų) skaičius

Z: protonų (atominis) skaičius

$^{12}_{6}C$

18.1 lentelė

Nukleonas	Protonas	Neutronas
Masė (10^{-27} kg)	1,672 623	1,674 929
Krūvis (*e*)	1,00	0,00

?

A Pasitelkę duomenis, pateiktus periodinėje lentelėje, išsiaiškinkite, kiek neutronų yra kalcio (Ca, Z = 20) ir telūro (Te, Z = 52) atomų branduoliuose.

18.2 lentelė. **Periodinė lentelė**

Grupės / Periodai	I	II											III	IV	V	VI	VII	0
1										1 H Vandenilis 1								2 He Helis 4
2	3 Li Litis 7	4 Be Berilis 9											5 B Boras 11	6 C Anglis 12	7 N Azotas 14	8 O Deguonis 16	9 F Fluoras 19	10 Ne Neonas 20
3	11 Na Natris 23	12 Mg Magnis 24											13 Al Aliuminis 27	14 Si Silicis 28	15 P Fosforas 31	16 S Siera 32	17 Cl Chloras 35.5	18 Ar Argonas 40
4	19 K Kalis 39	20 Ca Kalcis 40	21 Sc Skandis 45	22 Ti Titanis 48	23 V Vanadis 51	24 Cr Chromas 52	25 Mn Manganas 55	26 Fe Geležis 56	27 Co Kobaltas 59	28 Ni Nikelis 59	29 Cu Varis 64	30 Zn Cinkas 65	31 Ga Galis 70	32 Ge Germanis 73	33 As Arsenas 75	34 Se Selenas 79	35 Br Bromas 80	36 Kr Kriptonas 84
5	37 Rb Rubidis 85.5	38 Sr Stroncis 88	39 Y Itris 89	40 Zr Cirkonis 91	41 Nb Niobis 93	42 Mo Molibdenas 96	43 Tc Technecis 98	44 Ru Rutenis 101	45 Rh Radis 103	46 Pd Paladis 106	47 Ag Sidabras 108	48 Cd Kadmis 112	49 In Indis 115	50 Sn Alavas 119	51 Sb Stibis 122	52 Te Telūras 128	53 I Jodas 127	54 Xe Ksenonas 131
6	55 Cs Cezis 133	56 Ba Baris 137	57 La Lantanas 139	72 Hf Hafnis 178.5	73 Ta Tantalis 181	74 W Volframas 184	75 Re Renis 186	76 Os Osmis 190	77 Ir Iridis 192	78 Pt Platina 195	79 Au Auksas 197	80 Hg Gyvsidabris 201	81 Tl Talis 204	82 Pb Švinas 207	83 Bi Bismutas 209	84 Po Polonis 210	85 At Astatis 210	86 Rn Radonas 222
7	87 Fr Francis 223	88 Ra Radis 226	89 Ac Aktinis 227	104 Db Dubnis 261	105 Jl Žolis 262	106 Rf Rezerfordis	107 Bh Boris	108 Hn Hanis	109 Mt Meitneris									

58 Ce Ceris 140	59 Pr Prazeodimis 141	60 Nd Neodimis 144	61 Pm Prometis 147	62 Sm Samaris 150	63 Eu Europis 152	64 Gd Gadolinis 157	65 Tb Terbis 159	66 Dy Disprozis 162.5	67 Ho Holmis 165	68 Er Erbis 167	69 Tm Tulis 169	70 Yb Herbis 173	71 Lu Liutecis 175
90 Th Toris 232	91 Pa Protaktinis 231	92 U Uranas 238	93 Np Neptūnis 237	94 Pu Platonis 242	95 Am Americis 243	96 Cm Kiuris 247	97 Bk Berklis 247	98 Cf Kalifornis 251	99 Es Einšteinis 254	100 Fm Fermis 253	101 Md Mendelevis 256	102 No Nobelis 254	103 Lr Lourensis 257

Metalas

Ne metalas

Atominis nr. **simbolis** Pavadinimas Masės nr.

?

B Patikrinkite, ar protonų sąveikos helio atome jėga tikrai lygi apie 2,3 N. Pasinaudokite tokiais duomenimis:

$r = 10^{-14}$ m;

jėgos konstanta $k = 9 \times 10^9$ N · m² · C⁻²;

$e = 1{,}6 \times 10^{-19}$ C

18.3 lentelė. **Jėgų siekio ir stiprio palyginimas**

Jėga	Santykinis stipris	Siekis
Stiprioji branduolinė	1	Apie 10^{-15} m
Elektromagnetinė	10^{-2}	Begalinis (atvirkštinio kvadrato dėsnis)
Gravitacijos	10^{-38}	Begalinis (atvirkštinio kvadrato dėsnis)

Žr. 2 klausimą.

1 Elemento atomas yra elektriškai neutralus

Vienodas elektronų ir protonų skaičius

Elektronų užimama sritis

Branduolys

Elektronų skaičius
= protonų skaičiui
= eilės numeriui periodinėje lentelėje
= Z

2 Elektronai pasiskirsto sluoksniuose:

Kiekviename sluoksnyje yra tam tikras elektronų skaičius

Paprastai sluoksnis visiškai užpildomas prieš pradedant pildyti sekantį sluoksnį

3 Kiekvieno sekančio periodinės lentelės eilutės atomo atominis skaičius yra vienetu didesnis už prieš jį esančio. Taigi jo branduolyje yra vienu protonu, o elektroniniame apvalkale – vienu elektronu daugiau. Tokiu atveju kiekvienas papildomas elektronas patenka į išorinį sluoksnį, iki šis užpildomas.

Elektronų skaičius:

2
2
5 (pilną sluoksnį sudaro 6)

Tai fluoras, labai reaktyvus halogenas

4 Visi elementai, esantys tuose pačiuose periodinės lentelės stulpeliuose, turi tą patį išorinio sluoksnio elektronų skaičių

2
2
6
2
5

Tai chloras, taip pat labai reaktyvus halogenas

18.5 pav. **Ryšys tarp atomo struktūros, jo cheminių savybių ir jo padėties periodinėje elementų lentelėje**

Branduolyje veikiančios jėgos

Elektrinė jėga

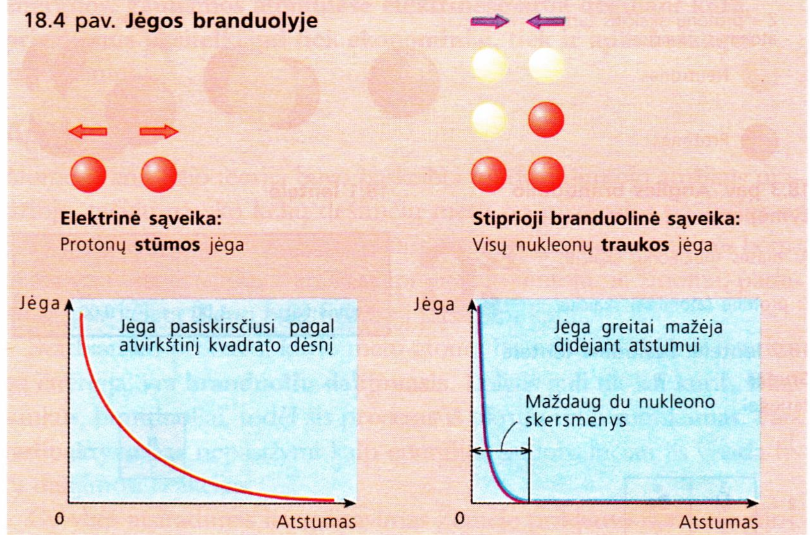
Teigiamo krūvio protonai stumia vienas kitą. Jų sąveikos jėgą galima nustatyti pagal formulę

$$F_E = \frac{ke^2}{r^2}$$

čia k yra elektrinės jėgos konstanta (9×10^9 N·m² · C⁻²), o r – atstumas tarp tų protonų. Jis yra ne didesnis už atstumus branduoliuose, sudarančius apie 10^{-14} m (žr. taip pat lygtį, pateiktą 1-os d. 238 p.). Taigi helio atome du protonai stumia vienas kitą maždaug 2,3 N jėga. Tai labai didelė jėga; tokia ji dėl to, kad protonai branduolyje yra labai arti vienas kito. Yrant branduoliui dalijimosi metu, ši jėga gali priversti skeveldras dideliu greičiu tolti vieną nuo kitos.

Stiprioji sąveika

Branduoliai egzistuoja, ir juos suardyti yra nelengva. Vadinasi, tarp nukleonų turi veikti jėga, laikanti juos branduolyje, dar stipresnė už elektrinę, veikiančią tarp protonų. Ši jėga, maždaug 100 kartų stipresnė už elektrinę, yra vadinama **stipriąja branduoline sąveika**. Priešingai elektrinėms ar gravitacijos jėgoms, stiprioji branduolinė sąveika yra artiveikė: ji siekia tik artimiausius, t. y. gretimus, nukleonus (18.4 pav.).



18.4 pav. **Jėgos branduolyje**

Chemija ir atomų struktūra

Elemento vieta periodinėje lentelėje nulemia jo chemines savybes; jų ryšys pavaizduotas 18.5 pav. Susijungiant vis daugiau ir daugiau nukleonų, randasi vis didesni ir didesni branduoliai, ir dėl to atsiranda ryšiai tarp atomo struktūros ir jo cheminių savybių.

Cheminių reakcijų metu sąveikauja tik išoriniai, silpniausiu ryšiu susieti atomų elektronai. Elementai, turintys vienodą išorinių elektronų skaičių, sąveikauja panašiai, todėl jie surikiuoti į tuos pačius periodinės elementų lentelės stulpelius, vadinamus **grupėmis**. Tai, pavyzdžiui, šarminių metalų grupė (litis, natris ir pan.), halogenų grupė (fluoras, chloras ir pan.), idealiųjų dujų grupė (helis, neonas ir pan.) bei kitos.

Izotopai

Visi branduoliai, išskyrus vandenilio atomo branduolį, turi abiejų rūšių nukleonų – ir protonų, ir neutronų. Lengvieji branduoliai turi maždaug vienodą protonų ir neutronų skaičių, tačiau ir šiuo atveju jų santykis gali būti įvairus, nes kiekvienas elementas turi bent jau keletą **izotopų**.

Kiekvienas elementas – tai atomas, turintis tam tikrą elektronų skaičių. Elemento elektronų skaičių nusako protonų skaičius jo branduolyje, nes apskritai atomas yra neutralus, visų jo sandaros elementų (branduolio ir elektronų) elektrinių krūvių suma turi būti lygi nuliui. Taigi elemento branduolyje turi būti tam tikras protonų skaičius, lygus jo elektronų skaičiui. Bet, kaip jau išsiaiškinome, branduolyje dar yra ir neutronų, o jų skaičius nėra kaip nors ribojamas. Todėl egzistuoja įvairūs to paties elemento **izotopai**, besiskiriantys tik neutronų, esančių branduolyje, skaičiumi. Žinoma, izotopų masės skiriasi. Pavyzdžiui, įprastinio anglies atomo branduolys yra sudarytas iš šešių protonų ir šešių neutronų, tačiau gamtoje sutinkamos septynios anglies atomų rūšys, kurių masės yra skirtingos. Vadinasi, egzistuoja septyni anglies atomo izotopai, surašyti 18.4 lentelėje. Visi jie turi tiek pat protonų ir elektronų – po šešis, ir todėl užima tą pačią vietą periodinėje lentelėje bei turi tas pačias chemines savybes.

Tik du anglies izotopai, kurių masių skaičiai yra 12 ir 13, yra **stabilūs**; kiti izotopai radioaktyvūs.

?

C Raskite periodinėje elementų lentelėje (45 p.) keturis elementus, turinčius tokį pat protonų ir neutronų skaičių.

18.4 lentelė. **Anglies izotopai**

Nukleonų skaičius A	Protonų skaičius Z	Neutronų skaičius (A – Z)
9	6	3
10	6	4
11	6	5
12 (98,89%)	**6**	**6**
13 (1,11%)	**6**	**7**
14	6	8
15	6	9

?

D Atvaizduokite tokių anglies izotopų struktūrą:

anglies-9, anglies-13, anglies-15.

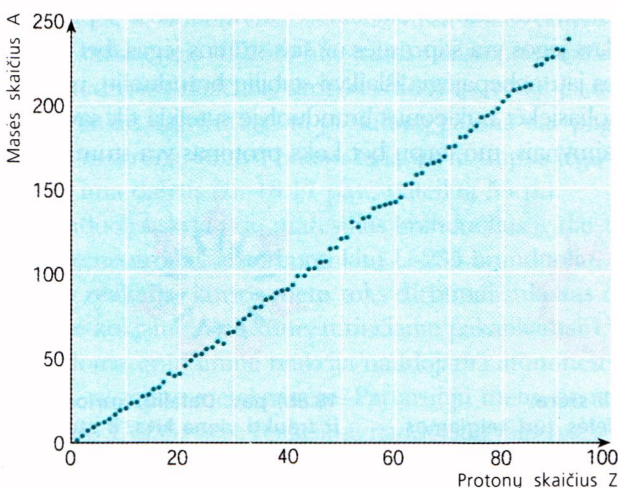
Santykinė atomų masė

Vis dėlto atomo masė yra labai maža, ir ji nusakoma tam tikru vienetu, vadinamu **atomo masės vienetu *u***. Šiuo vienetu apibrėžtos atomų masės vadinamos **santykinėmis atomų masėmis**. Tai gamtoje egzistuojančių elemento izotopų masių vidurkis, padalytas iš atomo masės vieneto.

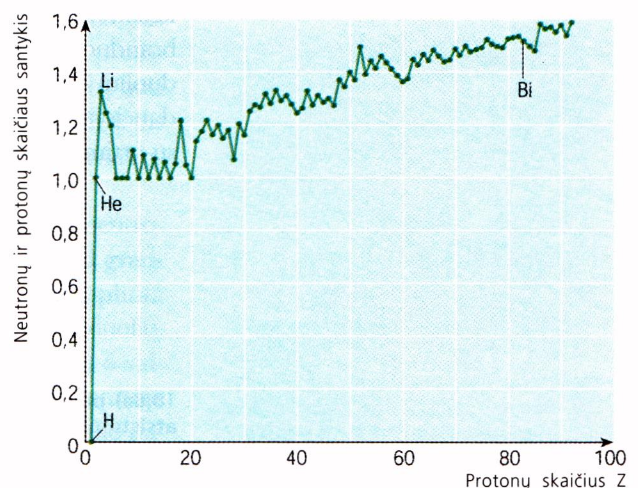
Atomo masės vienetas apibrėžiamas kaip viena dvyliktoji plačiausiai paplitusio anglies izotopo (anglis-12) masės dalis.

Didelių branduolių egzistavimo problema

Jei paimsime stabiliausią kiekvieno elemento izotopą ir pavaizduosime jų seką 18.6 pav., kur parodyta šių izotopų masės skaičiaus A priklausomybė nuo jų protonų skaičiaus Z, pamatysime, kad A (protonų plius



18.6 pav. **Masės (nukleonų) skaičiaus priklausomybė nuo protonų skaičiaus**



Pav. 18.7 **Neutronų ir protonų skaičiaus santykis**

neutronų skaičius) auga greičiau už Z (protonų skaičių). Pavyzdžiui, jei kalcio atomo branduolys (Ca-40) turi po 20 ir protonų, ir neutronų, tai švino atomo branduolys (Pb-206) jau turi tik 82 protonus ir net 124 neutronus. Šio A ir Z santykio kitimas dar aiškiau matomas 18.7 pav.

Branduoliai, didesni negu bismuto (Bi), turintys daugiau nei 83 protonus ir maždaug pusantro karto daugiau neutronų, jau esti nestabilūs. Visi jie yra **radioaktyvūs** – tai reiškia, anksčiau ar vėliau skyla, išspinduliuodami:

- **alfa dalelę,** t. y. iš dviejų protonų ir dviejų neutronų sudarytą branduolį, arba
- elektroną (kitaip vadinamą **beta dalele**), arba
- fotoną **(gama spindulius).**

Didžiausieji branduoliai dažnai suyra dar kitokiu būdu, pasidalydami į du maždaug vienodo dydžio branduolius ir keletą laisvų neutronų. Tai **branduolių dalijimosi** reakcijos.

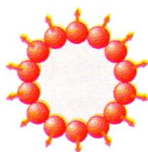
Stūma ir trauka branduolyje

Paprasčiausias atomo branduolio modelis yra **lašo modelis**, sutapatinantis nukleonus su vandens molekulėmis, o patį branduolį – su vandens lašu. Molekulės laše juda, kadangi turi kinetinės energijos, tačiau molekulių tarpusavio traukos jėgos išlaiko jas laše. Tai ir sąlygoja *paviršiaus įtempimą*: molekulės, esančios lašo paviršiuje, traukiamos į vidų, ir lašas įgauna sferos formą, nes būtent sferos paviršius yra mažiausias plotas, kurį gali užimti į tam tikrą tūrį įeinančios dalelės.

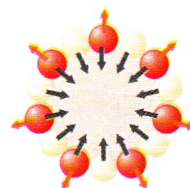
Akivaizdu, kad molekulės, turinčios pakankamai kinetinės energijos, gali palikti tą sferą, t. y. išgaruoti. Taip pat jei lašas tampa per didelis, traukos jėgos darosi per silpnos pasipriešinti gravitacijai ir išlaikyti sferos formą, ir lašas suskyla į mažesnius lašelius.

Dabar pagalvokime apie atomo branduolį. Jį sudarančios dalelės – nukleonai, panašiai kaip vandens molekulės laše, traukia vienas kitą ir sukelia branduolio paviršiaus įtempimo jėgas. Nukleonų sąveikos jėgos, išlaikančios branduolio formą, yra sukeltos *artisiekės* **stipriosios branduolinės** sąveikos. Svarbi jų savybė yra ta, kad jų siekis yra toks mažas, kad kiekvienas branduolio nukleonas sąveikauja tik su artimiausiais savo kaimynais.

Gravitacija, suardanti didelius vandens lašus, yra per silpna ką nors padaryti branduoliams, bet branduoliai turi kitokią ardančiąją jėgą, sukeliamą protonų elektrinės stūmos. Stabiliuose branduoliuose stipriosios branduolinės traukos jėgos yra stipresnės už šias stūmos jėgas, bet branduoliui didėjant jos jau nebepajėgia išlaikyti stabilių branduolių, nes ardančioji jėga yra toliasiekė: nukleonus branduolyje sutelkia tik sąveikos su artimiausiais kaimynais, tuo tarpu bet koks protonas yra stumiamas



18.8a) pav. Nestabili sfera: atsistumiančios dalelės turi teigiamos potencinės energijos, kuri greitai virsta kinetine, ir joms išsilaksčius sfera suyra (parodytos tik dalelės, esančios sferos paviršiuje)



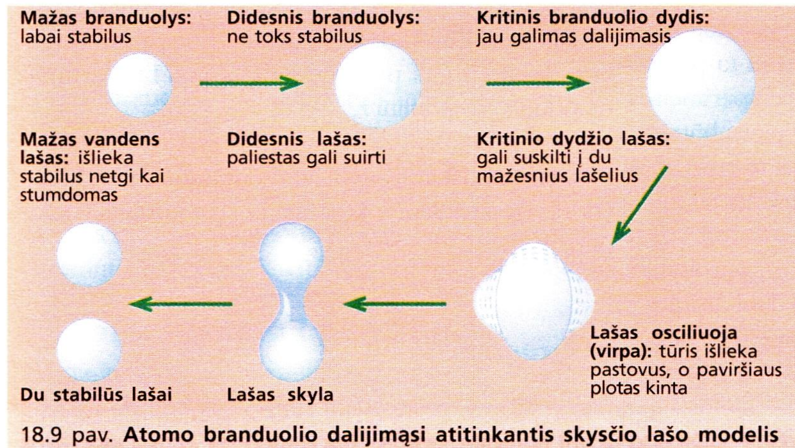
18.8b) pav. Dalelių, kurios gali ir traukti viena kitą, ir stumti, gali būti ir stabilioje būsenoje, visuma

visų kitų to branduolio protonų. Kuo daugiau branduolyje protonų, tuo didesnė yra ši stūmos jėga, ir ji pradeda vyrauti, nes traukos jėgos visada tokios pat. Šis efektas iliustruojamas 18.8 pav.

Taigi branduolio protonai skatina dalijimąsi. Ši tendencija yra gana stipri, nes net iš dviejų protonų sudarytas branduolys nebūtinai yra stabilus. Helio atomo branduolys stabilus tik dėl savo dviejų neutronų, kurie padidina stipriąją sąveiką šiame branduolyje ir nepadidina elektrinių stūmos jėgų. Neutronus galima įsivaizduoti kaip branduolių klijus, slopinančius stūmos jėgas.

Deja, per daug neutronų taip pat mažina branduolio stabilumą (žr. 18.6 pav.). Branduoliai su neutronų pertekliumi yra **radioaktyvūs**, linkę spinduliuoti alfa daleles; arba, jei yra dar didesni, gali suirti branduolinio **dalijimosi** metu į dvi daugmaž lygias skeveldras. Šie procesai sunkiai paaiškinami naudojant paprastą lašo modelį, bet jie vyksta visada, kai tik branduolyje yra daugiau nei 83 protonai. Alfa skilimui paaiškinti būtina remtis kvantine teorija (žr. 70 p.). Dalijimasis įvyksta, kai didelis branduolys įgauna dar kiek energijos, pavyzdžiui, absorbavęs kokį neutroną. Jis pradeda „virpėti", ir stūmos jėga lengvai suskaldo jį į dalis, kaip pavaizduota 18.9 pav.

■ Žr. 3 klausimą.



18.9 pav. **Atomo branduolio dalijimąsi atitinkantis skysčio lašo modelis**

2 BRANDUOLIO DALIJIMASIS

Labiausiai paplitęs urano branduolio izotopas yra U-238. Jis turi 238 nukleonus, ir, nors ir radioaktyvus, nėra linkęs dalytis. Urano izotopas su 235 nukleonais (U-235) turi trimis neutronais mažiau, taigi jo protonų ir neutronų skaičiaus santykis didesnis, todėl jis tarsi ir turėtų būti labiau linkęs dalytis. Tačiau jo skilimą galima dar pagreitinti, pridėjus prie jo neutroną. Matyt, būtent tada suyra trapus jėgų balansas ir branduolys ima dalytis (žr. 18.17 pav., pateiktą 55 p.).

Branduolys skyla į du mažesnius branduolius ir dar du ar tris neutronus. Šie neutronai, absorbuoti kitų U-235 branduolių, gali sukelti **grandininę reakciją**, kurios metu toks dirbtinai sukeltas dalijimasis plinta savaime kokiame nors kūne, turinčiame pakankamai U-235 branduolių. Nevaldoma grandininė reakcija naudojama atominėse bombose, o valdoma – atominėse elektrinėse. Pastaruoju metu, be natūraliai gamtoje randamo U-235, šiose reakcijose naudojami taip pat ir kitokie linkę panašiai skilti branduoliai.

Branduolio matmenys

Paprasta teorija
Protono ir neutrono masės yra beveik vienodos.

Jeigu tarsime, kad ir jų abiejų tūriai V yra beveik vienodi, tai branduolio, turinčio A nukleonų, tūris bus maždaug lygus Av.

Jei branduolys yra sfera, kurios spindulys r, tai:

$$\text{apytikslis branduolio tūris} = Av = \frac{4}{3}\pi r^3$$

Šį rezultatą galime pateikti tokiu pavidalu:

$$r = r_0 A^{\frac{1}{3}}$$

kur r_0 yra eksperimentiškai nustatyta konstanta; jos vertė yra $1{,}2 \times 10^{-15}$ m.

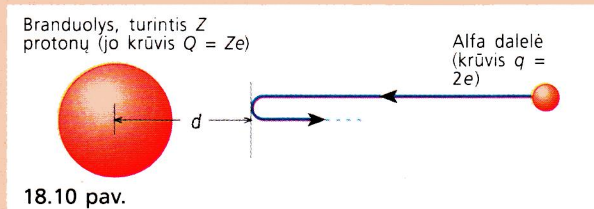
Eksperimentinis įrodymas
Elektringų dalelių pluoštą nukreipus į metalą, kai kurios jų atsimušusios nuskrieja atgal beveik ta pačia kryptimi, kuria atsklido. Pirmam tokiam eksperimentui buvo naudojamos alfa dalelės (18.10 pav.); būtent analizuojant šio eksperimento rezultatus ir buvo atrasta, kad atomai turi branduolius. Eksperimentas aprašytas 58 p.

Tai, kas vyksta šio eksperimento metu, parodyta 18.23 pav. Atlekianti dalelė atšoka todėl, kad atsimuša į branduolį. Jos kinetinė energija E_k pereina į elektrinę potencinę energiją E_p.

Didžiausio suartėjimo taške visa E_k virsta E_p, taigi:

$$\frac{1}{2}mv^2 = k\frac{qQ}{d} = k\frac{2Ze^2}{d}$$

kur k yra elektrinės jėgos konstanta (9×10^9 N · m^2 · C^{-2}), o kiti dydžiai – tokie, kaip pateikta 18.10 pav.



18.10 pav.

Atlėkusios dalelės energija, kaip ir dalelės bei branduolio krūviai, yra žinomi. Vadinasi, galima apskaičiuoti d. Kuo didesnė dalelės energija, tuo arčiau branduolio ji gali priartėti, taigi d gali būti artimas branduolio spinduliui r.

Eksperimentiškai įrodyta, kad dauguma branduolių yra sferos pavidalo, o konstanta r_0 jau nustatyta anksčiau.



E Platinos branduolio masės skaičius yra 195. Apskaičiuokite to branduolio dydį.

F Alfa dalelė ($Z = 2$) susiduria su platinos branduoliu, kurio $Z = 78$. Alfa dalelės kinetinė energija lygi 8×10^{-13} J (5 MeV), o protono krūvis – $1{,}6 \times 10^{-19}$ C. Nustatykite, kiek tokia alfa dalelė gali priartėti prie branduolio centro. Ar šis dydis palyginamas su branduolio dydžiu, apskaičiuotu **E** klausime?

3 RYŠIO JĖGOS IR RYŠIO ENERGIJA

Kūnai Žemės paviršiuje laikosi dėl gravitacijos jėgos. Pakeltas nuo Žemės kūnas, įgyja potencinės energijos, todėl norint atskirti jį nuo Žemės tenka atlikti tam tikrą darbą. Atitinkama energija vadinama gravitacine potencine energija; ją išnagrinėjome 4 skyriuje. Tame skyriuje apskaičiavome vieno kilogramo masės energiją Žemės paviršiuje. Kadangi kūną laiko prie Žemės traukos jėga, o be galo toli nuo Žemės nutolusio kūno potencinė energija tampa lygi nuliui, tai prie Žemės paviršiaus potencinė energija turi būti neigiama.

Nors ši reikšmė apskaičiuota kūno masei m, iš tikrųjų tai yra ne tik tos masės – tai Žemės ir kūno *sistemos* energija. Ji vadinama Žemės ir kūno sistemos ryšio energija; kaip nustatėme 4 skyriuje, ji lygi:

$$-G\frac{Mm}{r}$$

kur G yra gravitacinė konstanta, M – Žemės masė, r – jos spindulys.

Analogiškai dalelės branduolyje sudaro sistemą, ir ji turi tam tikrą ryšio energiją. Traukos jėga šiuo atveju yra ne gravitacijos jėga – ji lygi *stipriosios branduolinės sąveikos* ir *elektrinės jėgos*, veikiančių priešingomis kryptimis, sumai. Jėgų veikimas visiškai tapatus stebėtam Žemės ir kūno sistemoje: norint suskaldyti stabilų branduolį, reikia suvartoti tam tikrą energijos kiekį. Deja, neįmanoma apskaičiuoti šią energiją paprastai sumuojant jėgas, veikiančias kiekvieną nukleoną, nes dvi aptartos jėgos, veikiančios branduoliuose, paklūsta skirtingiems dėsniams, ir sistema yra sudėtingesnė nei sistema su vienintele, t. y. gravitacijos, jėga. Tačiau galima šią problemą lengvai išspręsti remiantis nuostabia idėja, teigiančia, kad

Masė ir energija yra ekvivalenčios.

4 MASĖS DEFEKTAS

■ Žr. 4 ir 5 klausimus.

Kaip matome 18.1 lentelėje, fizikams pavyko dideliu tikslumu išmatuoti ir branduolių, ir protono bei neutrono mases.

Helio branduolys turi du neutronus ir du protonus, todėl būtų galima tikėtis, kad jo masė lygi $2m_p + 2m_n$, tai yra $6{,}695104 \times 10^{-27}$ kg. Deja, šis skaičius yra *didesnis* už tikrąją helio branduolio masę. Skirtumas, sudarantis $0{,}048322 \times 10^{-27}$ kg, vadinasi **masės defektu**.

Protono masė m_p lygi
$1{,}672\,623 \times 10^{-27}$ kg
Neutrono masė m_n lygi
$1{,}674\,929 \times 10^{-27}$ kg
Helio branduolio masė lygi
$6{,}646\,782 \times 10^{-27}$ kg

Einšteinas ateina į pagalbą

Šis masių skirtumą galėsime pagrįsti, jei suvoksime, kad jis atspindi energijos praradimą jungiantis nukleonams į helio branduolį. Panašiai kaip koks nors kūnas, krisdamas ant Žemės, praranda turėtą potencinę energiją, taip ją praranda ir nukleonai, susijungdami į helio branduolį. Energijos nuostolis nusakomas masės nuostoliu, nes šiuos dydžius sieja Einšteino sąryšis $\Delta E = c^2\Delta m$. Įrašę šviesos greičio vertę, lygią 3×10^8 m/s, galime išreikšti helio masės defektą **ryšio energija**, lygia $4{,}349 \times 10^{-12}$ J.

G Naudodamiesi Einšteino masės ir energijos sąryšiu įsitikinkite, kad helio branduolio ryšio energija lygi $4{,}349 \times 10^{-12}$ J.

Nukleono ryšio energija

Dažnai naudinga kokiame nors branduolyje apskaičiuoti **vieno nukleono ryšio energiją**. Tai vidutinė energija, kurios reikia norint pašalinti iš branduolio vieną nukleoną. Aptariamam helio-4 branduoliui ši energija lygi ketvirtadaliui pilnutinės ryšio energijos, t. y. $1{,}0873 \times 10^{-12}$ J.

Jei reikia dydį, išmatuotą elektronvoltais, perskaičiuoti į džaulius, padauginkite jį iš elektrono krūvio e, t.y. $1{,}6 \times 10^{-19}$ C.

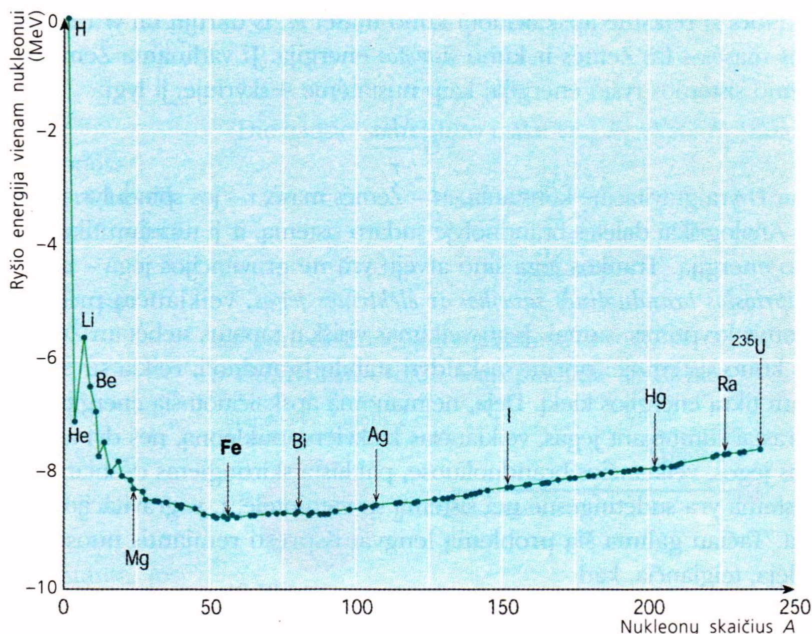
Fizikai dažniausiai energiją matuoja **elektronvoltais**. Ką tai reiškia, paaiškinta 1-os d. 232 puslapyje. Nesunku apskaičiuoti, kad helio-4 branduolyje vieno nukleono ryšio energija lygi –7,07 MeV.

Nukleono ryšio energija yra naudinga branduolio charakteristika, nes ji rodo nukleonų ryšio branduolyje stiprumą. Ryšio energijos priklausomybė nuo branduolio protonų skaičiaus pavaizduota 18.11 pav. Branduolys, kuriame nukleonai surišti stipriausiai, yra geležies branduolys ($Z = 26$, $A = 56$). Patekę į geležies branduolį, nukleonai „įkrinta" į giliausią palyginti su kitais branduoliais duobę. Kita vertus, tai reiškia, kad norint juos iš šio branduolio „ištraukti", reikia daugiausiai energi-

H a) Kiek džaulių atitinka **(i)** 2 eV, **(ii)** 4 MeV?

(2 eV yra energijos kiekis, reikalingas jonizuoti kokiam nors atomui; 4 MeV yra energija, kurią įgyja išlekianti iš radioaktyvaus branduolio alfa dalelė.)

b) Perskaičiuokite į elektronvoltus: **(i)** $1{,}09 \times 10^{-12}$ J, **(ii)** 25 J.



18.11 pav. **Ryšio energijos, tenkančios vienam nukleonui, grafikas. Kai kurie cheminiai elementai yra pažymėti**

jos. Taigi geležis yra stabiliausia iš visų branduolių. Kaip pamatysime sekančiame skyrelyje, branduolio padėtis šioje kreivėje rodo, kokiu būdu – branduoliams dalijantis ar jungiantis – išskiriama energija.

Branduolių sintezės energija

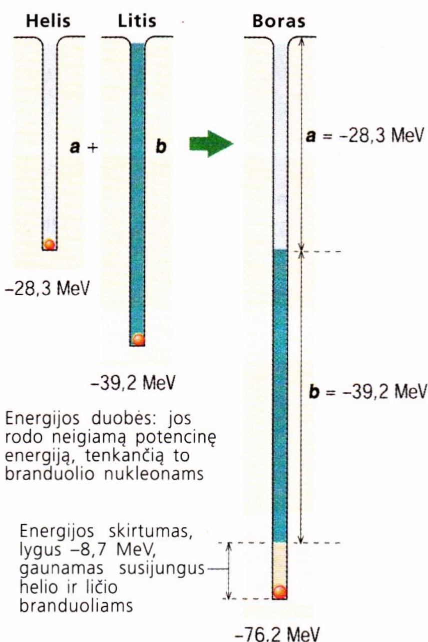
Teoriškai suliejus bet kokius du branduolius galima gauti trečią. Panagrinėkime helio ($Z = 2$, $A = 4$) ir ličio ($Z = 3$, $A = 7$) jungimąsi. Atskirai sudėję jų krūvius ir atominius numerius turėtume gauti boro ($Z = 5$, $A = 11$) branduolį. Suardydami mažuosius branduolius į sudarančius juos nukleonus gautume tokią jų ryšio energiją (MeV):

- Ryšio energija 4 helio branduolio nukleonams (MeV) –28,30
- Ryšio energija 7 ličio branduolio nukleonams (MeV) –39,25
- Pilnutinė ryšio energija 11 nukleonų (MeV) –67,55

Realaus boro-11 branduolio ryšio energija lygi –76,21 MeV. Taigi susijungiant heliui ir ličiui į borą *išlošiama* 8,66 MeV (76,21 – 67,55) energija. Tai reiškia, kad nukleonai boro branduolyje turi mažesnę potencinę energiją, arba, kitais žodžiais tariant, jie įkrinta į gilesnę potencialo duobę. Šis energijos kiekis gali būti išspinduliuotas ir kaip nors praktiškai panaudotas, tačiau aptartoji reakcija nėra itin naudinga praktiškai, nes litis yra retai sutinkamas elementas.

Heliui susidarant iš keturių protonų (visa reakcijų seka pateikta 55 p. ir 27 skyriuje) išsiskiria 26,7 MeV energija. Pažvelkite į 18.11 pav.: šuolis nuo vandenilio (vienas protonas) iki helio yra didelis, taigi jungiantis protonams į helį išsiskiria dar didesnė, nei heliui ir ličiui jungiantis į borą, energija.

Praktiškai sunku sukelti netgi lengviausiųjų branduolių sintezės reakcijas, nes toliasiekė teigiamo krūvio branduolių elektrinės stūmos jėga sukuria potencialo barjerą, neleidžiantį jiems suartėti. Tai reiškia, kad branduolių sintezės reakcija savaime prasidėti negali, nes stipriosios branduolinės traukos jėgos pradeda veikti tik labai suartėjus branduoliams. Norint tą barjerą įveikti, susiduriantys branduoliai turi turėti pakankamai kinetinės energijos. Palankios tam sąlygos susidaro būtent



18.12 pav. **Helis ir litis, susijungdami į boro branduolį, išskiria 8,7 MeV ryšio energijos**

Žr. 6 ir 7 klausimus. ■

AR GALIMA PASIGAMINTI AUKSO BRANDUOLINĖS SINTEZĖS REAKCIJOMIS?

Auksas visada buvo, o ir dabar yra brangus metalas, todėl žmonės visais laikais stengėsi rasti būdą pasigaminti jį iš pigesnių elementų. Ar negalima tam panaudoti branduolių sintezės reakcijų?

Branduolių jungimosi energija išskiriama tik ties 18.11 pav. kreivės minimumu, t. y. susidarant geležiai ($Z = 26$, $A = 56$). Bet koks bandymas sujungti netoli šio minimumo esančius branduolius, norint gauti sunkesnius už geležį elementus, pareikalauja *daugiau* energijos, nei jos gaunama suyrant lengvesniems branduoliams.

Tarkime, norime gauti aukso branduolį ($Z = 79$, $A = 197$), jungdami geležį ($Z = 26$, $A = 56$) su jodu ($Z = 53$, $A = 127$).

Geležies ryšio energija (MeV)	–492,5
Jodo ryšio energija (MeV)	–1072,6
Pilnutinė ryšio energija (MeV)	–1565,1
Aukso ryšio energija (MeV)	–1559,4

Taigi, kad vyktų ši reakcija, turėtume suvartoti tam tikrą energijos kiekį, kadangi pageidaujama būsena yra aukštesniame lygmenyje, negu pradinių būsenų energijų suma. Energijų skirtumas sudaro 5,7 MeV. Pasirodo, energetiškai naudingiau yra kasti auksą iš Žemės gelmių.

Ši sintezė, kurios metu energija ne išsiskiria, o turi būti suvartota, ir „užgesina" žvaigždes bei sąlygoja jų „mirtį". Tiksliau visa tai aprašyta 27 skyriuje.

žvaigždėse, kadangi jų gelmėse temperatūra siekia dešimtis milijonų laipsnių ir susiduriantys branduoliai juda išties dideliais greičiais.

Ryšys tarp temperatūros ir vidutinės dujų (ar plazmos) kinetinės energijos yra pateiktas 1-os d. 160 p.:

$$\frac{1}{2}m\overline{c^2} = \frac{3}{2}kT$$

5 BRANDUOLIŲ MASĖS MATAVIMAI

Masių spektrografas

Tikslius branduolių masių matavimus galima atlikti naudojant **masių spektrografą** (18.13 pav.).

Šis įrenginys veikia taip. Emituoti atomai jonizuojami elektronų pluoštu B, tada pagreitinami ir patenka į spektrografo kamerą D, kur skirtingų masių jonai išsklaidomi skirtingomis trajektorijomis.

Jonai *atskiriami* naudojant magnetinį lauką, statmeną paveikslėlio plokštumai. Šio lauko jėgos, statmenos jonų judėjimo krypčiai, veikia kaip įcentrinės jėgos ir verčia jonus judėti lenktomis trajektorijomis. Kaip žinome, įcentrinė jėga F priverčia masę m, kurios greitis v, judėti išilgai lanko, kurio spindulį r galima nustatyti pagal formulę:

$$F = \frac{mv^2}{r}$$

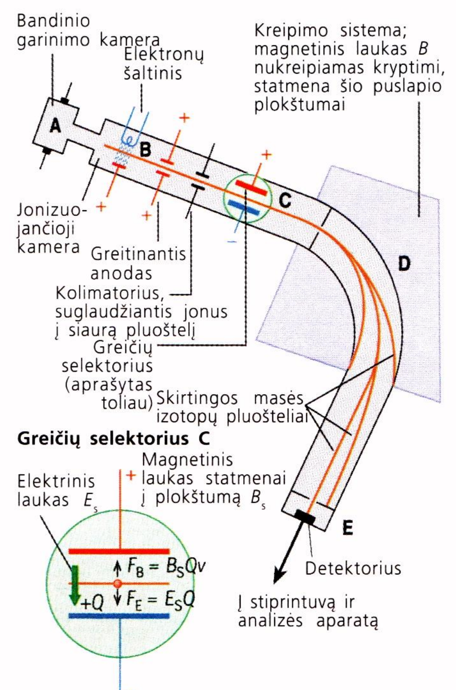
Esant lauko stipriui B, o krūviui Q judant greičiu v, ši jėga lygi BQv, taigi:

$$F = BQv = \frac{mv^2}{r}$$

Iš čia galime rasti spindulį r:

$$r = \frac{mv}{BQ} \qquad [1]$$

Ši paprasta teorija pagrįsta prielaida, kad visi atomai jonizuojami vienodai, t. y. visų jų krūviai Q yra lygūs 1.



18.13 pav. **Masių spektrografas**

Greičių selektorius

Atkreipkite dėmesį – norint pagal [1] formulę apskaičiuoti spindulį, reikia žinoti jonų greitį v. Kad vienodos masės ir vienodo krūvio jonai judėtų ta pačia trajektorija, jų greičiai taip pat turi būti vienodi. Tai pasiekiama **greičių selektoriuje**, kuris 18.13 pav. pažymėtas raide **C**. Skirtingais greičiais skriejantys jonai selektoriuje patenka į statmenai orientuotus magnetinį B_s ir elektrinį E_s laukus (žr. paveikslėlio fragmentą). Kadangi abu laukai yra statmeni vienas kitam ir jonų judėjimo krypčiai, elektrinė jėga (E_sQ) ir magnetinė jėga (B_sQ_v) veikia priešingomis kryptimis. Kai šios jėgos vienodo didumo, jonų trajektorijos neiškraipomos ir jie pakliūva į *kreipimo sistemą* **D**. Vienodo didumo jėgos veikia tik tada, kai jonai juda tam tikru greičiu v:

Žr. 8 ir 9 klausimus. ■

$$B_S Q v = E_S Q$$

Taigi $$v = E_S / B_S \qquad [2]$$

Jonai, judantys kitokiais greičiais, nukrypsta nuo pradinės krypties ir į **D** nepatenka.

Nukreipiančiojo lauko stipris B gali būti keičiamas, taigi į detektorių E galima nukreipti įvairios masės jonus. Detektorius skaičiuoja pavienius jonus, todėl galima išmatuoti tiriamo bandinio sudėtį, kitaip tariant, santykinius įvairių masių jonų kiekius. Pagal [1] ir [2] formules

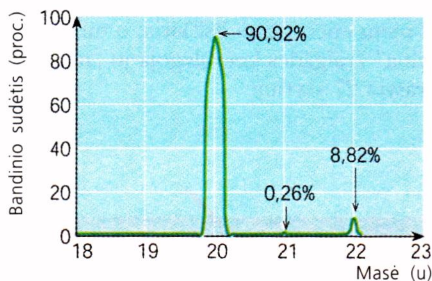
$$r = \frac{mv}{BQ} \quad \text{ir} \quad v = \frac{E_S}{B_S}$$

gauname: $$r = \frac{mE_S}{BQB_S}$$

Todėl $$m = \frac{QrBB_S}{E_S} \qquad [3]$$

Taigi $m = kB$, kur k yra konstanta.

18.14 pav. parodytas konkretus rezultatas, gautas naudojant masės spektrometrą.



18.14 pav. **Neono izotopus atitinkanti kreivė, gauta masės spektrometru**



I Jonas, judantis 800 m/s greičiu, masės spektrometre praskrieja tarp dviejų plokštelių, nutolusių viena nuo kitos 5 mm atstumu ir turinčių 1000 V potencialų skirtumą. Koks magnetinis laukas (teslomis) reikalingas, kad jonas išlaikytų pradinę judėjimo kryptį?

Atominis masės vienetas *u*

Nelengva tiksliai išmatuoti konstantos k ([3] formulė) vertę, todėl įvairių jonų masės m matuojamos santykiniais *standartinės branduolių masės* vienetais u. Tai **atominis masės vienetas**, lygus vienai dvyliktajai anglies-12 branduolio masės. Jis lygus $1{,}660\ 540\ 2 \times 10^{-27}$ kg. Anglies branduolio masė šiais vienetais lygi 12 u.

Protono masė lygi 1,0072765 u.

6 BRANDUOLIŲ SINTEZĖ ŽEMĖJE

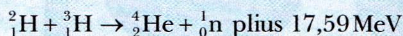
Vandenilinė bomba ir tokamakas

Branduolinė sintezė dirbtinai sukeliama sprogstant „vandenilinei bombai“. Pirmą kartą toks sprogimas įvykdytas 1952 metais. Jame buvo pasinaudota nevaldoma grandinine branduolių *dalijimosi* reakcija, kuri pakelia vandenilio izotopų (paprasto vandenilio ir deuterio 2H) temperatūras iki verčių, pakankamų jiems suartėti tiek, kad galėtų prasidėti helio branduolinės sintezės reakcijos. Tai vadinama **termobranduoliniu virsmu (reakcija)**. Tokios bombos yra daug tūkstančių kartų galingesnės nei pirmosios atominės bombos, panaudotos kare su Japonija 1945 m.

KONTROLIUOJAMA BRANDUOLINĖ SINTEZĖ – PAGRINDINIS ENERGIJOS ŠALTINIS?

Rusija, Jungtinės Valstijos ir Europos Sąjunga jau daug metų bando sukurti veikiantį valdomos termobranduolinės energijos šaltinį. Didžiausia problema yra gauti ir palaikyti aukštą temperatūrą, būtiną, kad vyktų ši reakcija, tuo pat metu išlaikant didelių energijų daleles arti viena kitos, nes tai būtina norint palaikyti valdomą sintezės reakciją.

Šiai reakcijai naudojamas dviejų vandenilio izotopų – deuterio ir tričio (2H ir 3H) dujų mišinys. Aukštoje temperatūroje dujų molekulės suskyla į atomus, o pastarieji – į elektronus ir branduolius, sudarydami **plazmą.** Kad prasidėtų sintezės reakcija, plazmos temperatūra turi siekti 10^7 K. Tik tokiu atveju branduoliai įgyja pakankamai kinetinės energijos ir gali susidūrę pradėti jungtis.



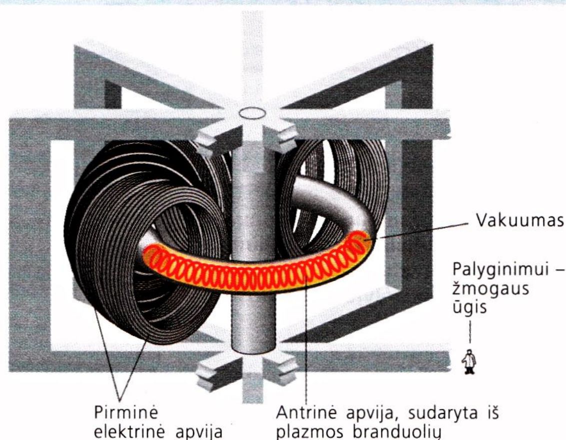
$$^{2}_{1}H + ^{3}_{1}H \rightarrow ^{4}_{2}He + ^{1}_{0}n \text{ plius } 17{,}59\,\text{MeV}$$

Dujų temperatūra pakeliama vadinamuoju **indukciniu kaitinimu**; elektrinė apvija yra pirminė, o plazmos branduoliai – antrinė transformatoriaus apvija. Aukšto dažnio kintamoji srovė pirminėje apvijoje indukuoja jonų srovę, ir jie įgyja kinetinės energijos. Tarp kitko, aukštą temperatūrą galima gauti ir apšvietus dujas intensyvia lazerio šviesa.

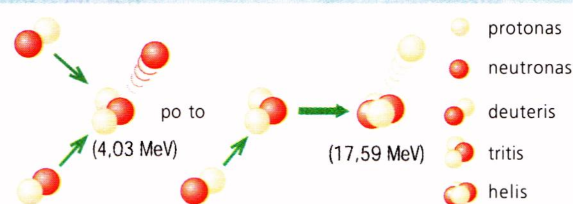
Aukštoje temperatūroje gali išsilydyti ir išgaruoti ne tik dujos, bet ir medžiagos, iš kurių pagamintas pats įrenginys, naudojamas reakcijai. Todėl plazma turi būti laikoma ne bet kur, o „magnetiniame inde", nes stiprus magnetinis laukas priverčia didelės energijos branduolius judėti spiralės trajektorija toro – tokio kūno, panašaus į riestainį, paviršiuje. Galima suderinti lauko stiprį taip, kad tie branduoliai judėtų toli nuo įrenginio sienelių ir jų aukšta temperatūra nebūtų perduodama įrenginiui. Tokio įrenginio, vadinamo tokamaku, schema pavaizduota 18.15 pav.

Iki 1996 m. geriausi rezultatai naudojant tokamaką buvo gaunami Anglijoje esančiame Culhamo Jungtiniame Europos įrenginyje. Pavyzdžiui, 1991 metais 1,7 MW galios impulsas buvo išlaikytas 2 sekundes. Vis dėlto įrenginys daugiau energijos suvartodavo negu jos išsiskirdavo vykstant sintezės reakcijai. Nors gautasis rezultatas yra didelis pasiekimas, sunku patikėti, kad valdoma termobranduolinė sintezė greitai taps praktišku energijos šaltiniu – jos realizavimas gali trukti dar ne vieną dešimtmetį.

Didžiausias sintezės reakcijų pranašumas yra tas, kad kaip žaliava naudojami vandenilio izotopai, lengvai išskiriami iš vandens, o galutinis produktas yra neradioaktyvus helis. Vis dėlto reikia pabrėžti, kad reakcijos metu išsiskiria ir labai radioaktyvus tritis. Kita vertus, reakcijos metu išsiskyrę neutronai kameros sienelėse taip pat sukuria įvairius radioaktyvius izotopus.



18.15 pav. Tokamakas – branduolių sintezės reaktorius

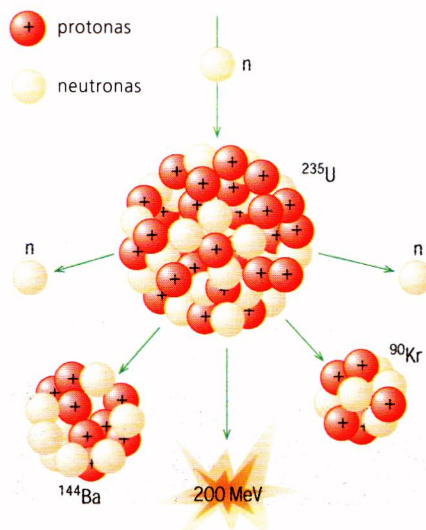


18.16 pav. Tokamake vykstančios branduolinės sintezės reakcijos

7 BRANDUOLINIAI REAKTORIAI

18.11 pav. pateikta ryšio energijos kreivė rodo, kad energijos galima gauti skaldant branduolius, sunkesnius nei geležis, kuri yra žemiausiame kreivės taške. Kad vyktų tokios reakcijos, abu naujai susidarantys branduoliai turi būti iš kreivės „dugno" aplinkos. Geriausias branduolys, skylantis tokiu būdu, yra uranas-235. Šio branduolio skilimas labai retai vyksta, bet jį galima paskatinti lėtaisiais neutronais.

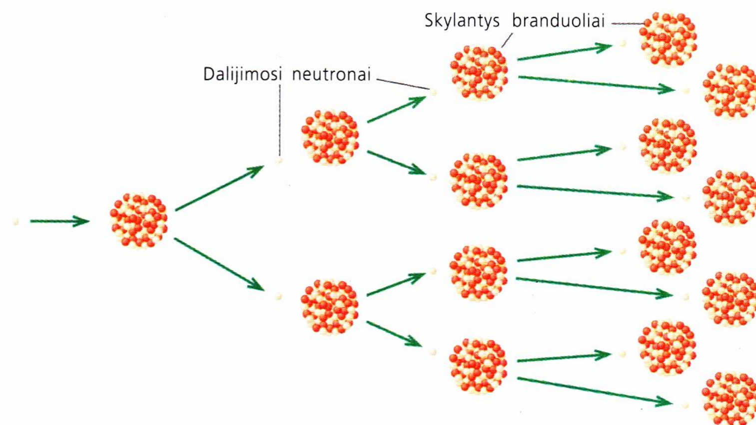
Dalijimosi, parodyto 18.17 pav., produktai – baris ir kriptonas – yra tik du iš daugelio galimų. Atkreipkite dėmesį – reakcijos metu išsiskiria ir du neutronai. Tai reiškia, kad kitų bandinio branduolių dalijimasis juos sugeriant gali išaugti į **grandininę reakciją.**



Pav. 18.17 **Branduolių dalijimasis. Nestabilus branduolys prisijungęs neutroną ima dalytis; tai ir panaudojama branduoliniuose reaktoriuose**



J Urano-235 branduolys skyla į du mažesnius branduolius ir tris neutronus. Kokie dar galėtų būti, be jau minėtų bario ir kriptono, šie lengvesnieji branduoliai?



18.18 pav. **Grandininė reakcija. Kiekvieno dalijimosi akto metu atsiranda du ar daugiau neutronų. Kiekvienas jų sukelia naują skilimą ir todėl skatina nevaldomą branduolių dalijimąsi. Paveikslėlyje dalijimosi produktai neparodyti**

Kritinė masė

Bet kuriame gabalėlyje medžiagos, turinčios urano-235 atomų, nuolatos vyksta savaiminis šių atomų branduolių dalijimasis ir išsiskiria neutronai. Jei bandinyje tokių atomų nedaug, tai beveik visi atsiradę neutronai išlekia į išorę, nesukeldami naujų dalijimosi reakcijų. Taip atsitinka todėl, kad bet kokia medžiaga, kaip ir pavienis atomas, daugiausiai sudaryta iš tuštumos, ir tikimybė tam neutronui susidurti su mažais šen bei ten toje tuštumoje esančiais branduoliais yra labai nedidelė.

Tačiau tarkime, kad šio besidalijančios medžiagos gabalėlio masė, taip pat ir tūris, auga. Išsiskiria vis daugiau neutronų, padidėja jų susidūrimo tikimybė. Tai reiškia,vis dažniau įvyksta *indukuotasis* dalijimasis, masėje išsiskiria vis daugiau energijos, ir ji šyla.



K Reaktoriuje esančių branduolių ryšio energijos yra tokios:

urano-235	–1736,8 MeV
bario-144	–1161,5 MeV
kriptono-90	–754,6 MeV

a) Įsitikinkite, kad išsiskirianti viename tokio dalijimosi akte energija sudaro apie 180 MeV.

b) Vienas urano-235 metalo gramas turi apie $2{,}5 \times 10^{21}$ branduolių. Įvertinkite, kiek energijos (džauliais) gali išsiskirti skylant branduoliniame reaktoriuje vienam gramui urano-235.

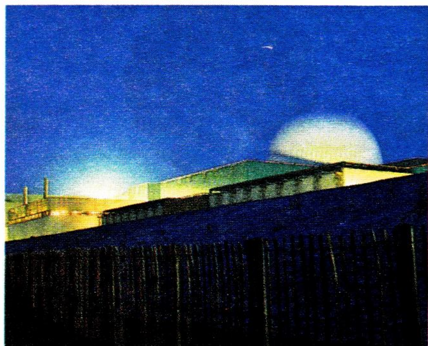
Sprogimas ar lydymasis?

Tai klasikinis **teigiamojo grįžtamojo ryšio** pavyzdys: vykstant daugiau dalijimosi aktų išsiskiria daugiau neutronų, kurie savo ruožtu sukelia dar daugiau dalijimųsi. Pakankamai didelėje besidalijančiosios medžiagos masėje indukuotasis dalijimasis sukelia staigią grandininę reakciją, kai didelis branduolių skaičius suyra per labai trumpą laiką. Tai sukelia griūtinį energijos išsiskyrimą, kitaip tariant – sprogimą. Duotos sudėties medžiagai masė, kurią pasiekus tai įvyksta, priklauso dar ir nuo tos masės formos. Sferos pavidalo tokia masė vadinama **kritine mase**.

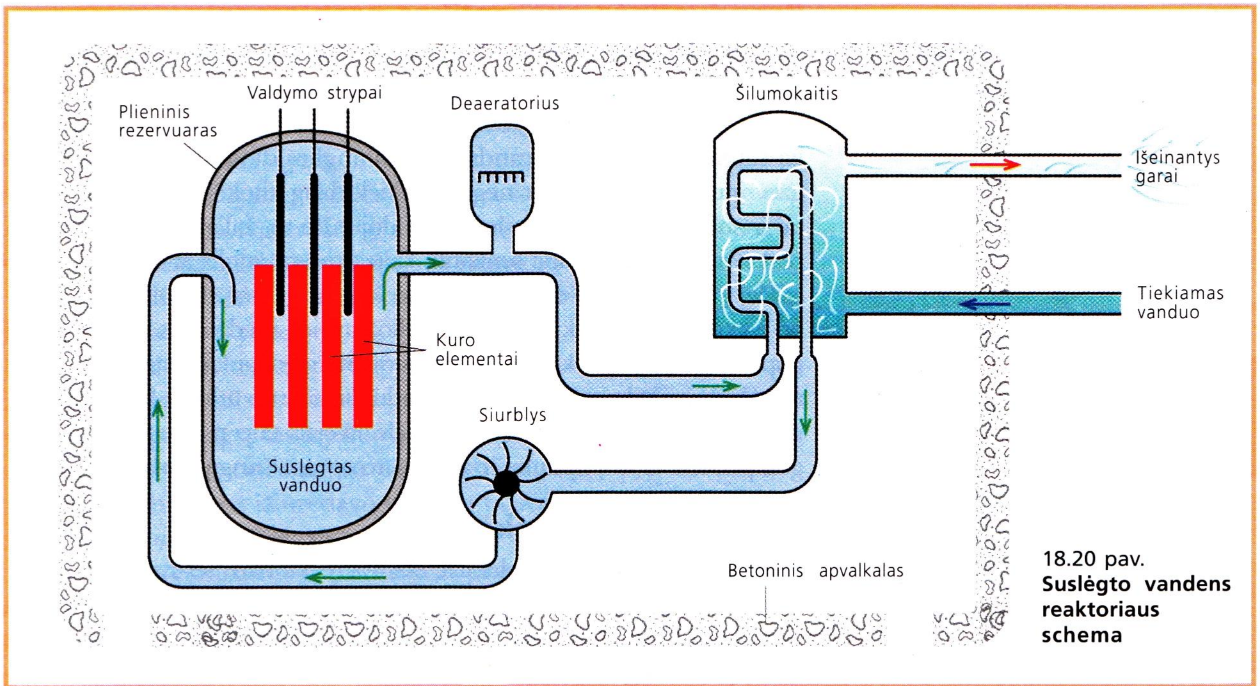
Paprastai įdėjus urano prisodrintos medžiagos į konteinerį kritinė masė nepasiekiama, nes dar iki tol išsiskirianti energija lydo (ir garina) uraną. Tai yra „lydymasis“, reakcija, kuri būtent ir įvyko katastrofoje su branduoliniu reaktoriumi Černobylyje 1986 metais.

Branduolinio reaktoriaus konstrukcija

Energija branduoliniame reaktoriuje generuojama branduolinio **kuro kasetėse**, patalpintose nerūdijančiuose plonuose vamzdeliuose, įstatomuose į reaktoriaus **šerdį**. Apie šerdį cirkuliuoja suslėgtos dujos arba vanduo. Kuro kasetės yra pagamintos iš urano (galėtų būti ir plutonis) oksido, kuris yra prisodrintas, t. y. turi 97 procentus urano-238 ir 3 procentus urano-235. Reaktoriaus šerdyje paprastai yra apie 80 tonų urano oksido. Skylantys urano-235 branduoliai būtent ir yra pagrindinis šiose kasetėse gaminamos energijos šaltinis.



18.19 pav. **Sizewell'o elektrinė**



18.20 pav. **Suslėgto vandens reaktoriaus schema**

Indukuotojo skilimo skatinimas lėtaisiais neutronais

Neutronai, atsirandantys savaime dalijantis uranui-235, juda dideliais greičiais. Greitieji neutronai turi labai nedaug galimybių patekti į gretimus branduolius ir sukelti dalijimosi reakcijas, o lėtiesiems tai pavyksta.

Neutronams lėtinti kuro kasetės apgaubiamos **lėtikliais**. Tam dažnai naudojamas grafitas, o šiuolaikiniuose suslėgtojo vandens reaktoriuose panaudojamas tas pats aušinimo vanduo. Greitieji neutronai, susidurdami su lėtiklio molekulėmis, kaskart praranda kinetinės energijos ir sulėtėja, taigi jie susidūrę gali sukelti aktyvesnį **indukuotąjį dalijimąsi**.

Valdoma reakcija

Prasidėjus indukuotajam dalijimuisi, gali išsiskirti pernelyg daug neutronų ir reakcija gali tapti nevaldoma, todėl perteklinius neutronus reikia pašalinti, kad reakcija vyktų pastoviu greičiu ir būtų galima reguliuoti išskiriamos energijos kiekį. Tam į reaktoriaus šerdį kartu su kuro tabletėmis įdedami ir **valdymo strypai**, kurių medžiaga, pavyzdžiui, boras ar kadmis, absorbuoja neutronus.

Branduolinio reaktoriaus energijos panaudojimas

Dalijimosi produktai yra lengvesnieji branduoliai, proceso metu įgaunantys nemažus greičius. Susidurdami su aplinkiniais branduoliais, jie perduoda dalį savo kinetinės energijos, todėl reaktoriaus šerdyje esančios kuro tabletės, lėtikliai ir valdymo strypai labai įkaista. Jiems aušinti reaktoriaus šerdyje, taip pat jos aplinkoje cirkuliuoja skystis, dažniausiai – suslėgtas vanduo, kaip 18.20 pav. Dėl šios priežasties dauguma reaktorių ir yra vadinami **suslėgtojo vandens reaktoriais**.

Taigi energiją iš reaktoriaus šerdies perima vanduo. Jis yra labai perkaitintas, temperatūra siekia 325 °C, o jo slėgis pakeliamas iki 150 atmosferų, kad negaruotų. Per šilumokaitį jis perduoda šilumą antrojo kontūro vandeniui, kurio garai suka turbiną, ir taip gaminama elektros energija.

Branduolinės energetikos problemos

Iš pirmo žvilgsnio atrodytų, kad branduolinės energijos naudojimas išsprendžia daugelį problemų, sukeliamų naudojant tradicinį kurą, tokį kaip akmens anglis ar naftos produktai. Branduolinė energetika nesukelia šiltnamio efekto, atsirandančio dėl anglies dioksido, išskiriamo degant įprastiniam kurui, ir negamina tiek daug kitokių pavojingų sveikatai ir sukeliančių rūgščiuosius lietus dujų. Be to, žaliava branduoliniam reaktoriui ne taip greitai senkanti, kaip akmens anglis ar nafta.

Deja, branduolinė energetika kelia kitų problemų. Nuolat yra tikimybė įvykti avarijoms, kurių metu radioaktyvios medžiagos gali išsiveržti į aplinką. Net jei elektrinė eksploatuojama idealiai laikantis visų saugos reikalavimų, kyla problemų su branduolinio kuro atliekų laikymu ir atgyvenusių elektrinių uždarymu – šiais atvejais taip pat radioaktyvumas gali prasiskverbti į aplinką ir atlikti savo pragaištingą darbą.

?

L Kokie nuostoliai atsiranda naudojant kurui ne branduolinį kurą, o akmens anglį ar naftos produktus?

Branduolinės atliekos

Netgi neradioaktyvūs branduoliai, esantys reaktoriaus šerdyje arba jos aplinkoje, apšvitinti neutronų, tampa radioaktyviais. Dar radioaktyvesnės nei buvo prieš panaudojant tampa ir panaudotos kuro tabletės, nes jose lieka urano-238. Šis gali būti surinktas ir vėl panaudotas, bet didelė dalis reaktoriaus šerdies medžiagos vis dėlto yra pavojingi radioaktyvieji teršalai.

Į **radioaktyviuosius teršalus** įeina ir labai aktyvūs trumpaamžiai izotopai, ir ilgaamžiai, kurių labai didelės pusėjimo trukmės (pavyzdžiui, plutonis-239, susidarantis iš urano-238; jo pusėjimo trukmė yra 24 000 metų). Šie teršalai turi būti ilgai laikomi specialiose saugyklose, laukiant, kol dauguma tokių izotopų suskils į stabilius ar bent jau mažiau radioaktyvius.

Gal ir neblogai būtų tuos teršalus palaidoti kur nors giliai po Žeme, bet kas žino, ar ir ten būdami jie negali būti pavojingi? Optimalaus problemos sprendimo dar nerasta. Nemažai problemų kelia ir pačios branduolinės elektrinės, kai jos pasensta ir jas naudoti jau neekonomiška. Didžiulės, nors ir silpnai radioaktyvios, jų konstrukcijos taip pat turi būti saugiai palaidotos betoniniuose apvalkaluose.

Problemos su atliekomis labai pabrangina branduolinę energiją ir gali atsitikti, kad branduolinė energija ilgainiui taps ne pigesnė už gaunamą deginant akmens anglį, dujas ar naftos produktus. Kita vertus, tokia išvada gal irgi nepagrįsta, kadangi įprastinis kuras labai teršia aplinką, sukelia rūgščius lietus bei visuotinį šilimą, ir galbūt paaiškės, kad tas neigiamas poveikis yra kur kas kenksmingesnis nei iki šiol buvo manoma.

8 KAIP TIRIAMI BRANDUOLIAI

Pirmasis branduolių tyrimas – alfa dalelių sklaida

Pirmasis įrodymas, kad atomai turi branduolius, gautas sklaidant medžiagoje alfa daleles. Tuos eksperimentus 1909 metais, vadovaujant Ernestui Rezerfordui (*Rutherford*) atliko Geigeris ir Marsdenas (Mančesterio universitetete, D. Britanija).

Tais laikais daugelis fizikų įsivaizdavo atomą kaip sferą, pripildytą kažkokios tąsios teigiamo krūvio terpės, kurioje pasiskirstę, gal panašiai kaip razinos pyrago tešloje, neseniai atrasti elektronai. Rezerfordas nurodė savo asistentams – šiek tiek jau patyrusiam Hansui Geigeriui ir visai jaunam studentui Ernestui Marsdenui, patyrinėti, kas atsitiks alfa dalelėms atsimušus į metalo paviršių.

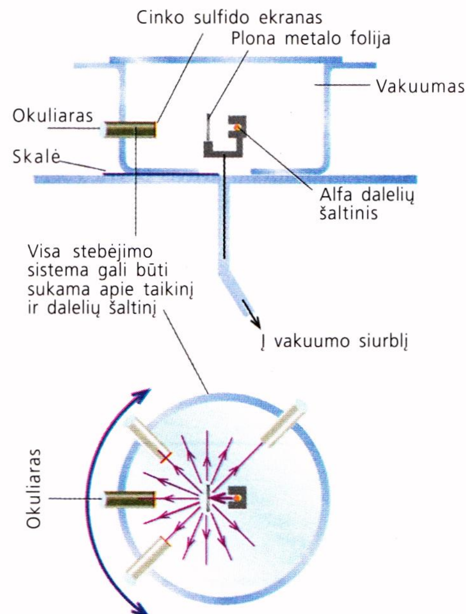
Jie naudojo prietaisą, kurio schema parodyta 18.21 pav. Pagrindinės prietaiso dalys, įgalinančios atlikti susidūrimų arba sklaidos tyrimą:

- didelio greičio dalelių šaltinis,
- vakuumas, sumažinantis susidūrimų galimybę,
- taikinys, arba tiksliau – jo atomai ir atomų sudėtinės dalys,
- detektorius išsklaidytoms dalelėms ar kitiems atsiradusiems bandymo metu fragmentams registruoti,
- priemonės matuoti išsklaidytų dalelių ar skeveldrų trajektorijoms.

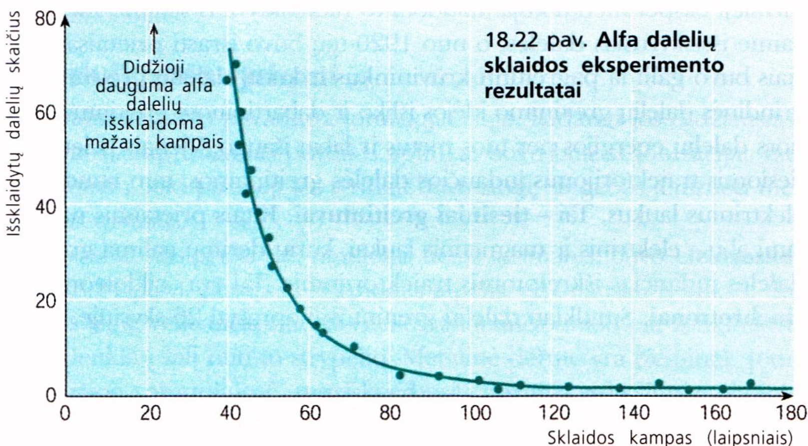
Radioaktyvusis šaltinis, skleidžiantis alfa daleles, įdedamas į švino dėžutę su nedidele skylute.

Taikinys yra plonytė, keleto atomų storio, aukso folija. Dauguma alfa dalelių tiesiog pralekia kiaurai pro ją ir atsimuša į stiklinį detektoriaus ekraną, padengtą fosforescuojančia medžiaga, sukeldamos vos pastebimus blyksnius (scinciliacijas). Tie blyksniai tokie silpni, kad Geigeris ir Marsdenas juos įžiūrėdavo tik apie pusvalandį prieš kiekvieną bandymą pratinę akis prie tamsos.

Detektoriaus ekranas buvo pritvirtintas prie tam tikros sukamos konstrukcijos, kurios pasisukimo kampą galima buvo matuoti. Būdinga išsklaidytų dalelių pasiskirstymo priklausomybė nuo sklaidos kampo parodyta 18.22 pav. Paaiškėjo, kad maždaug viena iš 8000 dalelių, atsimušusių į taikinį, beveik atšokdavo atgal, t. y. būdavo išsklaidoma labai dideliu kampu.



18.21 pav. **Geigerio ir Marsdeno tyrimas bei atomo branduolio atradimas**

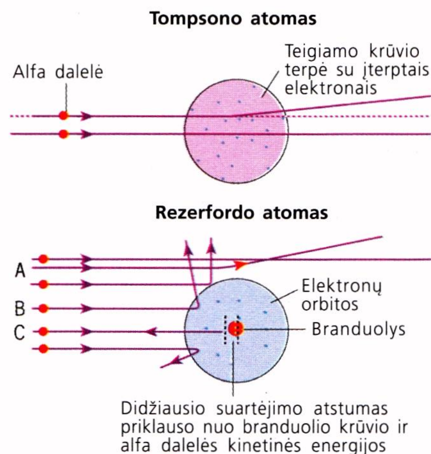


18.22 pav. **Alfa dalelių sklaidos eksperimento rezultatai**

Alfa dalelė gali taip atšokti tik susidūrusi su kokiu nors kitu teigiamą krūvį turinčiu objektu. Teigiamą krūvį turinčios terpės modelis negalėjo paaiškinti šių eksperimento rezultatų, nes pagal jį atsirandančios stūmos jėgos gali pakakti išsklaidyti masyviai alfa dalelei ne didesniu kaip 2 laipsnių kampu. Rezerfordas suprato, kad atome turi būti daug stipresnis teigiamo krūvio laukas, kurį gali sukurti tik didelio tankio teigiamas krūvis, sukauptas mažame tūryje.

Kad greita ir gana masyvi alfa dalelė galėtų susidūrusi taip atšokti, tame nedideliame tūryje taip pat turi būti sukaupta beveik visa atomo masė. Rezerfordas tą nedidelę erdvę, kurioje buvo visas teigiamas atomo krūvis ir beveik visa masė, pavadino atomo **branduoliu**. Tada elektronai, kurių masės palyginti su branduolio mase yra labai mažos, turėtų užpildyti beveik visą atomo tūrį.

Rezerfordo scenarijų, paaiškinantį eksperimentus su alfa dalelėmis ir taikiniu, iliustruoja 18.23 pav. Alfa dalelė A, praskriejanti gana toli nuo branduolio, visai nenukrypsta, nes elektrinis laukas tokiu atstumu yra per silpnas.



18.23 pav. **Alfa dalelių sklaida: Rezerfordas suprato, kad didelius alfa dalelių sklaidos kampus galima paaiškinti tik remiantis vieninteliu modeliu, pagal kurį atomas turi didelės masės teigiamo krūvio branduolį**

PAVYZDYS

K Alfa dalelė, kurios kinetinė energija lygi 5 MeV, kaktomuša susiduria su aukso atomo branduoliu. Kiek ji gali priartėti prie to branduolio centro?

Aukso branduolio krūvis Q yra $79e$, kur e – elektrono krūvis, lygus $1{,}6 \times 10^{-19}$ C, alfa dalelės krūvis – $2e$, o elektrinės jėgos konstanta k $(1/4\pi\varepsilon_0)$ lygi 9×10^9 N · m^2 · C^{-2}.

A Alfa dalelė sustoja priartėjusi prie branduolio tokiu atstumu r, kuriame visa jos kinetinė energija pavirsta elektrine potencine sąveikos su aukso branduoliu energija. Taigi:

$$E_K = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Qq}{r}$$

Pertvarkę gauname: $r = \dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0}\dfrac{Qq}{E_K}$

Įrašius reikšmes: $r = 9\times10^9 \times \dfrac{79\times1{,}6\times10^{-19}\times2\times1{,}6\times10^{-19}}{5\times10^6\times1{,}6\times10^{-19}}$

ir galutinai $r = 4{,}6 \times 10^{-14}$ m.

Arčiau branduolio esančios dalelės, tokios kaip B, labiau nukrypsta nuo pradinės judėjimo krypties. Labai nedaug dalelių **C**, susiduriančių su branduoliu beveik „kaktomuša“, atšoka ir nuskrieja atgal.

Rezerfordas nebuvo matematikas, todėl beveik dvejus metus užtruko jo skaičiavimai, susieję galų gale šį atomo modelį su išsklaidytų alfa dalelių skaičiaus priklausomybe nuo jų sklaidos kampo.

Žr. 10 ir 11 klausimus. ■

Dalelių greitintuvai

Pirmieji eksperimentuotojai naudodavo radioaktyvaus skilimo metu savaime išsiskyrusias daleles, o nuo 1920-ųjų buvo išrasti prietaisai, kuriais buvo galima pagreitinti krūvininkus ir keisti dalelių greičius. Pagrindinės dalelių greitinimo idėjos išliko ir dabartiniuose greitintuvuose, nors dalelių energijos per tuos metus ir labai išaugo. Vienais prietaisais tiesiomis trajektorijomis judančios dalelės greitinamos, tam naudojant elektrinius laukus. Tai – **tiesiniai greitintuvai**. Kitais prietaisais naudojami abu – elektrinis ir magnetinis laukai, kurių deriniu galima greitinti daleles judančias iškreiptomis trajektorijomis. Tai yra „ciklotronai“ ir **sinchrotronai**. Smulkiau dalelių greitintuvai aprašyti 26 skyriuje.

Žr. 12 klausimą. ■

9 NESTABILŪS BRANDUOLIAI IR RADIOAKTYVUMAS

Branduoliai yra **radioaktyvūs**, jei jie gali dalytis ir skleisti **jonizuojančiąją spinduliuotę**. Ši spinduliuotė taip vadinama todėl, kad atplėšia iš kitų atomų arba molekulių elektronus, t. y. paverčia juos krūvininkais, arba **jonais**, kitaip sakant, juos **jonizuoja**.

Radioaktyvumo tyrimai

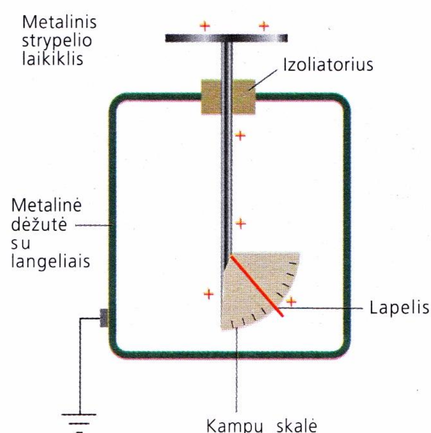
Radioaktyvumą 1896 m. atrado H. Bekerelis (*Henri Becquerel*, 1852–1908, Prancūzija). Jis tyrė fluorescenciją, t. y. kai kurių gamtinių mineralų švytėjimą tamsoje. Tą švytėjimą jis registruodavo naudodamas fotografines plokšteles, ir vieną dieną visai atsitiktinai aptiko, kad urano druska spinduliavo kažkokius *nematomus* spindulius, gebančius taip pat palikti pėdsakus tose plokštelėse.

Netrukus buvo nustatyta, kad egzistuoja trijų rūšių tokie spinduliai. Jie buvo pažymėti pirmosiomis trijomis graikų abėcėlės raidėmis – **alfa** (α), **beta** (β) ir **gama** (γ). 18.5 lentelėje pateikti šių spindulių šaltiniai ir jų savybės.

18.5 lentelė. **Jonizuojančiosios spinduliuotės savybės**

Spinduliuotė	Alfa	Beta	Gama
Šaltinis	Helio atomo branduolys (2n + 2p)	Elektronas	Elektromagnetinės spinduliuotės fotonas
Simbolis	He	e	γ
Krūvis	+ 2*e*	–*e* arba +*e*	Nėra
Siekis ore	1-5 cm	10–100 cm	Begalinis
Siekis aplinkoje	Sustabdo netgi popieriaus lapo storio kliūtis	Sustabdo 1 mm storio aliuminio lakštas	Intensyvumas sumažėja du kartus praėjus spinduliuotei pro 1 ar 2 cm storio švino sluoksnį
Masė atominiais vienetais	4 *u*	5×10^{-4} *u*	Nulis
Jonizacijos geba	Labai didelė (1)	Didelė (1/100)	Maža (1/10000)

Marija Kiuri (Lenkija/Prancūzija, 1867–1934) ir jos vyras Pjeras (Prancūzija, 1859–1906) išaiškino, kad spinduliuotės šaltinis jų eksperimentuose buvo uranas. Jie ištyrė ir kitus elementus, tokius kaip polonis ir radis, taip pat skleidžiančius didelės energijos spinduliuotę. Kiek vėliau fizikas Ernestas Rezerfordas (Naujoji Zelandija/Britanija, 1871–1937) ir chemikas F. Sodis (*Frederick Soddy*, Britanija, 1877–1956) bendradarbiavo tyrinėdami šios spinduliuotės kilmę ir pokyčius, kuriuos ji sukelia pakliuvusi į įvairias medžiagas. Jų tyrimai įgavo prasmę tik po to, kai Rezerfordo grupė 1909–1911 metais atrado atomų branduolius.



18.24 pav. **Elektroskopas**

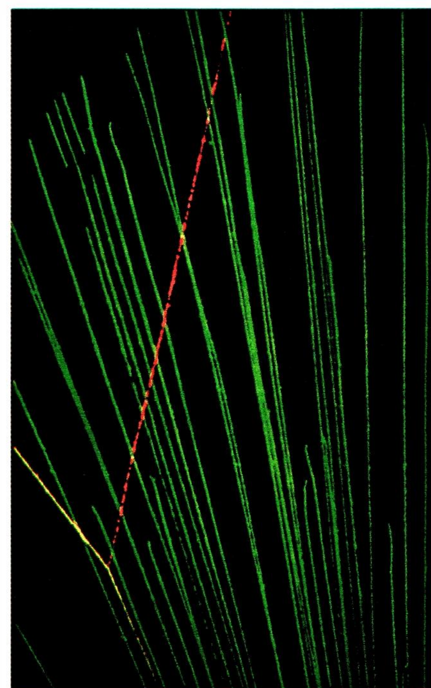
Spinduliuotės tyrimai

Spinduliuotė buvo pavadinta jonizuojančiąja, kadangi jos didžiausias, lengviausiai aptinkamas poveikis aplinkai buvo būtent jonizacija. Tad nenuostabu, kad pirmieji jos tyrimai buvo susiję su gebos jonizuoti medžiagas tyrimais.

Paprasčiausias prietaisas, naudotas tiems tyrimams, buvo **elektroskopas** (18.24 pav.). Įgavęs krūvį plonas lapelis, dažniausiai iš aukso, dėl stūmos jėgų, veikiančių nuo strypelio, įgaunančio tokio pat ženklo krūvį, atsilenkia į šalį nuo to strypelio. Metalinė dėžutė yra įžeminta. Jonizuojančioji spinduliuotė, prasiskverbusi į dėžutės vidų, jonizuoja joje oro molekules. Ir strypelis, ir lapelis, pritraukę priešingo krūvio jonus, praranda dalį krūvio, ir lapelio nukrypimo kampas sumažėja. Kampo sumažėjimas yra proporcingas jonizacijos laipsniui, taigi pagal jo didumą galima spręsti apie spinduliuotės poveikį.

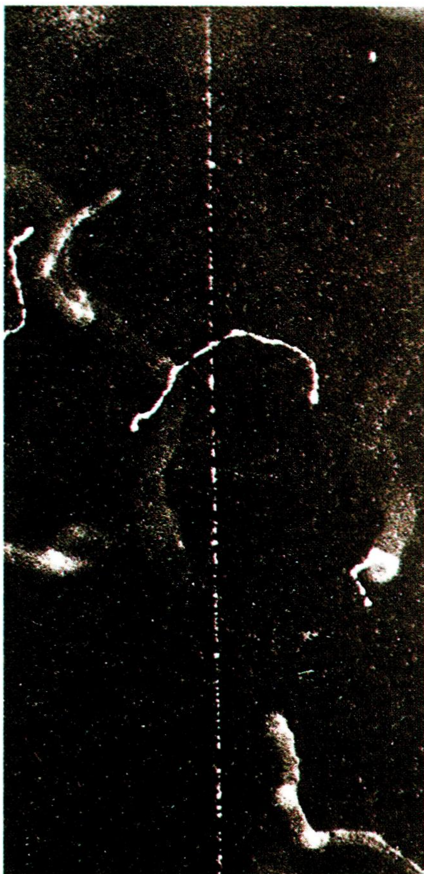
Vilsono kamera

Įrenginys, sukurtas stebėti jonizuojančiosios spinduliuotės sklidimo siekiui, buvo **Vilsono kamera**. Į šią kamerą prileidžiama drėgno vėsaus oro. Pėdsakas – nedideli mažučių vandens lašelių debesėliai, susikaupiantys apie jonus, atsirandančius spinduliuotei jonizavus oro molekules. Debesėliai susikaupia tik apie vadinamuosius „kondensacijos centrus“, kurie šiuo atveju ir yra tie jonai. Panašų vaizdą regite aukštai virš Žemės, kur oras yra pakankamai šaltas ir drėgnas, praskridus reaktyviniam lėktuvui. Paskui jį irgi susidaro kondensato šleifas. Alfa dalelių pėdsakus kameroje galite pamatyti 18.25 pav.

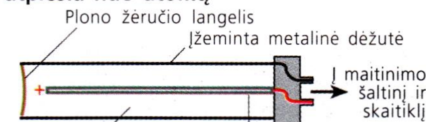


18.25 pav. **Alfa dalelių pėdsakai Vilsono kameroje**

18.26 pav. matomi beta dalelių pėdsakai. Jie yra ilgesni už alfa dalelių pėdsakus, bet daug plonesni, nes šie spinduliai daug mažiau jonizuoja negu alfa dalelės. Kuo stipriau aplinka jonizuojama, tuo daugiau energijos praranda jonizuojanti dalelė. Alfa dalelės kur kas masyvesnės



18.26 pav. **Centre matome greitų beta spindulių, atsiradusių radioaktyvaus dalijimosi metu, pėdsaką. Kreivi pėdsakai rodo mažesnių energijų elektronus, kuriuos rentgeno spinduliai atplėšia nuo atomų**



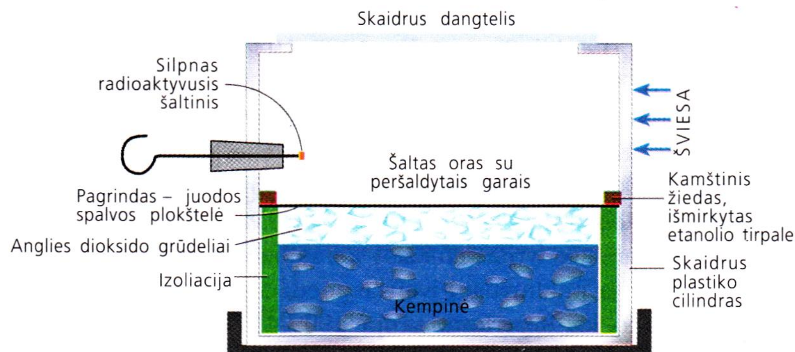
18.28a) pav. **Geigerio–Miulerio vamzdelis su langeliu gale, skirtas stebėti alfa dalelėms**



18.28b) pav. **Geigerio skaitiklis, kuriuo matuojamas blykstelėjimų skaičius per sekundę**

nei beta dalelės (helio branduolių masė palyginti su elektrono mase) ir turi dvigubai didesnį krūvį. Taigi alfa dalelė sąveikauja su didesniu molekulių skaičiumi ir praskriedama kiekvieną centimetrą praranda daug daugiau energijos nei beta dalelė.

Nedidelė Vilsono kamera parodyta 18.27 pav. Ji veikia be perstojo, nes palaikant žemą pagrindo temperatūrą vandens arba etanolio garai, esantys kameroje, būna nuolat peršaldyti. Vilsono kameros dar ir dabar yra naudojamos moksliniuose tyrimuose stebint radioaktyvumą arba energingas atomų daleles, nors dabar jau yra tobulesnių modifikacijų, tokių kaip **burbuliukų kameros** arba įvairiausi **dalelių detektoriai**, kur naudojamos plonos metalų plokštelės arba vielos. Jie aprašomi 26 skyriuje.



18.27 pav. **Paprasta Vilsono kamera. Jonizuojančioji spinduliuotė sukuria „kondensacijos centrus“, paliekančius kameroje pėdsaką. Geriausiai registruoja alfa daleles**

Geigerio skaitiklis

Labiausiai paplitęs vienas seniausiųjų prietaisų jonizuojančiajai spinduliuotei tirti yra **Geigerio skaitiklis**. Pagrindinė jo dalis – **Geigerio–Miulerio (GM) vamzdelis**, kaip parodyta 18.28a) pav. Jį sudaro uždaras metalinis vamzdelis su ilga plona vielute viduryje, pripildytas žemo slėgio inertinių dujų, pavyzdžiui, argono. Vielos ir to įžeminto vamzdelio korpuso potencialų skirtumas sudaro apie +400 V. Spinduliuotė patenka į vamzdelį pro plonasienį langelį jo priekyje. Alfa dalelės labai lengvai sugeriamos įvairiose aplinkose, todėl tas langelis pagamintas iš plono žėručio, nes turi ne tik lengvai praleisti alfa daleles, bet ir būti pakankamai tvirtas, kad išlaikytų slėgių skirtumą tarp aplinkos ir dujų vamzdelio viduje.

Vamzdelyje spinduliuotė jonizuoja argono atomus. Teigiamus argono jonus traukia įžemintas vamzdelis, o neigiamus elektronus – vielutė. Judantys šie krūvininkai dėl įtampų skirtumo dar pagreitinami ir susiduria su kitais argono atomais. Jei jų greičio pakanka, tai ir tie atomai gali būti jonizuojami, ir galų gale jonizacijos procesas tampa griūtinis. Smarkus krūvininkų srautas vamzdelyje sukelia srovės impulsą vielutėje, kuris gali būti elektroniniu stiprintuvu sustiprintas. Sustiprintus impulsus skaičiuoja **skaičiavimo įtaisai** arba **spartos matuokliai**, kuriais išmatuojamas vidutinis impulsų skaičius per sekundę. Taip pat šiuos impulsus galima praleisti per garso įrenginį ir paversti garso signalais. Tada radiacijos lygio rodiklis – šių signalų dažnis.

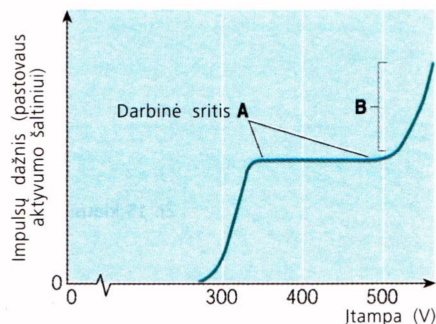
Krūvininkų srautas pralekia pro dujų vamzdelį per tam tikrą laiką, todėl egzistuoja tam tikra **neveikos trukmė** (maždaug 200 ms), kurios metu vamzdelis nereaguoja į naują spinduliuotę.

Beta ir gama detektoriai yra panašūs, tik beta detektoriaus langelis gaminamas iš stiklo, o gama detektoriai daugiausia ištisai metaliniai.

GM vamzdelio darbinė įtampa

Vielutės įtampa turi būti pakankamai didelė, kad pagreitintų jonus ir elektronus tiek, jog prasidėtų griūties reiškinys. Kita vertus, ji negali būti tokia didelė, kad vyktų nuolatinė iškrova, kaip taške **B** 18.29 pav. Tai įvyksta, kai jonai, atsitrenkiantys į metalo sieneles, turi pakankamai energijos išmušti iš jų elektronams, o tie, savo ruožtu, judėdami link vielutės, jonizuoja naujus argono atomus.

18.29 pav. pavaizduota impulsų dažnio, kuris tiesiog proporcingas srovei vamzdelyje, priklausomybė nuo įtampos, kai spinduliuotė yra pastovaus intensyvumo. **Darbinė sritis** rodo įtampų sritį, kurioje vamzdelis gali efektingai dirbti. Šioje įtampų srityje visos to paties tipo jonizuojančiosios dalelės sukelia tokio pat dydžio krūvio impulsą.



18.29 pav. Būdinga GM vamzdelio kreivė

Kietojo kūno detektoriai

Pramonėje ir tyrimo laboratorijose daugiausiai naudojami „kietojo kūno" detektoriai. Jie padaryti iš puslaidininkių. Spinduliuotė, patekusi į tokį detektorių, išlaisvina elektronus ir sukelia srovės impulsus, bylojančius apie spinduliuotę. Naudojant šiuos detektorius galima išmatuoti ne tik pavienius impulsus, bet taip pat ir spinduliuotės energiją.

Fotografinė detekcija

Fotoaparato veikimas paremtas tuo, kad regimos šviesos fotonai jonizuoja kai kurias chemines medžiagas, pavyzdžiui, sidabro nitratą ar jo druskas. **Spinduliuotės matuokliai**, aprašyti 24 skyriuje, pagrįsti šiuo reiškiniu. Jie praverčia, dirbant aplinkose, kur yra pavojus būti apšvitintiems, tai yra atominėse elektrinėse, ligoninių rentgeno kabinetuose ar laboratorijose, kur dirbama su radioaktyviomis medžiagomis.

Foninis spinduliavimas

Geigerio skaitiklis rodo esant spinduliuotę bet kuriame Žemės taške. Tai **foninis spinduliavimas**. Jį sukelia nedideli radioaktyvių medžiagų kiekiai, esantys akmenyse ir dirvožemyje, atmosferoje ir įvairiose mus supančiose medžiagose. Be to, Žemę nuolatos pasiekia didelių energijų dalelės, atlekiančios iš kosminės erdvės ir Saulės – vadinamieji **kosminiai spinduliai**. Jie gali skaldyti atmosferos molekulių branduolius ir sukurti kitas didelių energijų daleles, sukeliančias jonizaciją. Daugelis jų pasiekia Žemės paviršių.

■ Žr. 13 klausimą.

Foninis spinduliavimas labai priklauso nuo vietos Žemėje, kur jis yra matuojamas. Paprastai tai vienas ar du blyksniai per sekundę, tačiau jie gali būti dažnesni netoli vulkaninės kilmės kalnų, kur daug granito ir kitų mineralų, turinčių radioaktyviųjų elementų. Dėl šių elementų radioaktyviojo skilimo gali susidaryti radonas – tokios radioaktyvios dujos, kurios turi tendenciją kauptis patalpose ir pakelti jose foninio spinduliavimo lygį.



M GM vamzdelio tiriamasis plotas yra apie 3 cm². Jūsų namuose jis rodo maždaug 1,5 blyksnio per sekundę. Įvertinkite, kiek jonizuojančiųjų dalelių per sekundę patenka į jūsų kūną.

10 AKTYVUMAS IR PUSĖJIMO TRUKMĖ

Radioaktyviojo šaltinio **aktyvumas** matuojamas per sekundę išspinduliuojamų jonizuojančiųjų dalelių skaičiumi. Kiekvienas spinduliavimo aktas reiškia kokio nors atomo branduolio pasikeitimą ir apibūdinamas **skilimo sparta**. SI sistemoje aktyvumo (ir skilimo spartos) vienetas yra **bekerelis** (Bq);

1 Bq = 1 skilimas per sekundę.

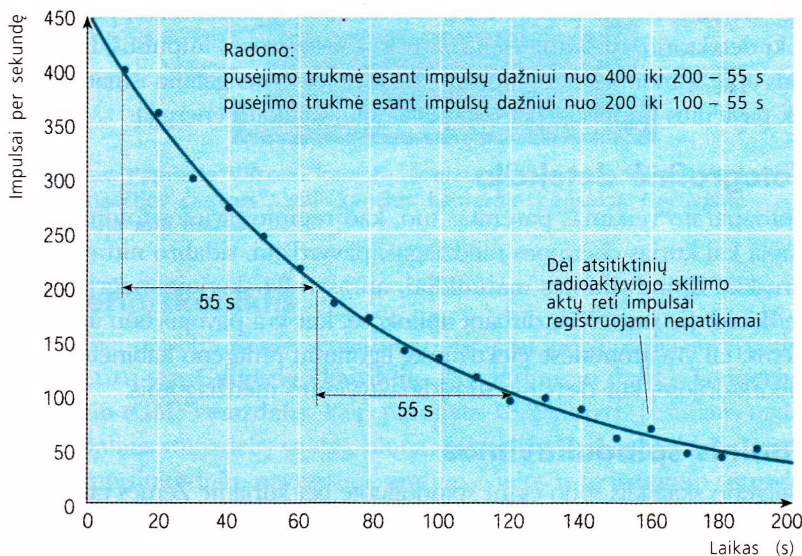
Žr. 14 klausimą.

Prietaisais matuojama spinduliuotė priklauso ir nuo naudojamo prietaiso, todėl įprasta ją tapatinti su Geigerio skatiklio **impulsų dažniu.** Tai yra registruojamų per sekundę impulsų skaičius. Paprastai laikomasi nuostatos, kad ji tiesiog proporcinga aktyvumui, nors užregistruojami ne visi šaltinio branduolių skilimo aktai. Dalį spinduliuotės sugeria pats šaltinis, ir dažniausiai matuojant užregistruojama tik nedidelė spinduliuotės dalis, kuri pasiekia skaitiklį.

Žr. 15 klausimą.

Ilgainiui šaltinio aktyvumas, taigi ir impulsų dažnis, vis mažėja. 18.30 pav. parodyta būdinga alfa dalelių srauto priklausomybė nuo laiko mažame radioaktyvių dujų radono ($^{220}_{86}Rn$) bandinyje.

Žr. 16 klausimą.



18.30 pav. **Radono-220 aktyvumo kreivė**

Žr. 17 klausimą.

Paveikslėlio grafikas nubrėžtas kiek galima tiksliau per realiai išmatuotų taškų aibę. Impulsų skaičius per sekundę apskaičiuojamas padalijus iš 10 realiai užfiksuotų per 10 sekundžių impulsų skaičių.

Reikėtų atkreipti dėmesį į grafiko ypatumus. Pirma, ne visi išmatuoti taškai patenka į nubrėžtą kreivę; vadinasi, yra tam tikra matavimų paklaida. Antra, grafike papildomos plonos linijos rodo, kad laikas, per kurį impulsų dažnis sumažėja nuo 400 l/s iki 200 l/s, maždaug lygus 55 s, ir tiek pat laiko trunka periodas, per kurį impulsų dažnis sumažėja nuo 200 l/s iki 100 l/s. Taigi galima padaryti tokią išvadą:

Žr. 18 klausimą.

laikas, per kurį radioaktyvaus bandinio impulsų dažnis sumažėja perpus, nepriklauso nuo impulsų dažnio atskaitos pradžios.

Šis laikas vadinamas radioaktyviosios medžiagos **pusėjimo trukme**. Dar grįšime prie šios problemos, kai nuodugniau nagrinėsime tos kreivės formą.

Skilimo proceso atsitiktinis pobūdis

Visas radioaktyviojo skilimo ypatybes sąlygoja viena priežastis: *Neįmanoma nusakyti laiko, per kurį suskils koks nors atskirai paimtas radioaktyvusis branduolys*. Kitais žodžiais tariant, neįmanoma nuspėti, kuris iš šimto radono branduolių suskils pirmasis. Visi šie branduoliai yra visiškai vienodi ir visi turi vienodą galimybę suskilti. Skilimas yra visiškai *atsitiktinis procesas*. Tačiau jei bandinį sudaro šimtai milijardų radono branduolių, skilimo procesas vyksta pagal gana griežtus dėsnius. Šimtą milijardų turintis pavyzdėlis nėra kuo nors ypatingas, tokio skaičiaus radono atomų masė sudaro tik apie 4×10^{-12} g, t. y. tik keturias tūkstantmilijardąsias gramo dalis.

Nekintama radioaktyviojo skilimo proceso savybė yra ta, kad kiekvienas branduolys turi tam tikrą **apibrėžtą tikimybę** suskilti. Todėl jei tiriamąjį pavyzdėlį sudaro pakankamai daug radono branduolių, tai galime būti beveik tikri, kad per sekančias dešimt sekundžių tam tikras šių branduolių skaičius suskils – jie išspinduliuos alfa daleles. Taip pat kuo didesnis pavyzdėlis, tuo geriau išmatuotos impulsų dažnio vertės atitinka kreivę, o apskaičiuotos pusėjimo trukmės vertės tikslesnės.

N Avogadro skaičius yra 6×10^{23} molio. Radono santykinė atominė masė lygi 220. Įsitikinkite, kad 10^{10} radono atomų masė yra apie 4×10^{-12} g.

Pusėjimo trukmės kreivės forma

Eksponentinio kitimo dėsnis yra toks, kai kintančiojo dydžio pokytis proporcingas to dydžio vertei, nepriklausomai nuo to, ar tas dydis auga, ar jis mažėja. *Didėjančio* dydžio pavyzdys yra biologijoje įprastas kokios nors populiacijos narių skaičiaus augimas, kadangi gimstančiųjų populiacijos narių skaičius yra proporcingas bendram jų skaičiui.

Grafikas, pateiktas 18.30 pav., yra radioaktyviosios medžiagos **skilimo kreivė**, kuriai būdingas eksponentinis kitimas. Šiuo atveju radioaktyviųjų branduolių skaičius eksponentiškai *mažėja*, t. y. skilimo sparta *per vienodus laiko tarpus sumažėja vienodą skaičių kartų*. Radioaktyviajam skilimui įprasta šį santykį prilyginti vienai antrajai, todėl jį atitinkantis laikas ir vadinamas *pusėjimo trukme* (žr. 64 p.). Šis dėsnis būdingas ir kitokiems fizikiniams procesams; 1-os d. 221 p. su juo susidūrėme aprašinėdami kondensatorių įkrovą ir iškrovą.

Jei ΔN pažymėsime skaičių branduolių, suskylančių per trumpą laiką, lygų Δt, tai:

$$\Delta N = -kN\Delta t \qquad [1]$$

Minuso ženklas čia ir rodo, kad radioaktyvių branduolių skaičius jiems skylant *mažėja*. **Skilimo konstanta** k yra *tikimybės branduoliui skilti sekančią sekundę* matas. Kiekvienas radioaktyvusis branduolys turi savitą šios konstantos vertę.

Išplėstiniame intarpe, pateiktame 66 p., galite išsamiau paskaityti apie eksponentinį radioaktyviojo skilimo dėsnį.

■ Šio skyriaus užduotyje galėsite pasinaudoti dinamine duomenų lentele ir patikrinti, ar grafikas tenkina pusėjimo trukmės taisyklę.

Skilimo konstanta ir pusėjimo trukmė

Skilimo konstanta k rodo tikimybę skilti vieno ar kito radioaktyvaus izotopo branduoliui. Kuo jos vertė didesnė, tuo didesnis *santykis* branduolių, potencialiai galinčių skilti, su visu pavyzdėlio branduolių skaičiumi, tuo trumpesnė to izotopo pusėjimo trukmė. Minėtame išplėstiniame intarpe pateikiamas ryšys tarp skilimo konstantos ir pusėjimo trukmės. Jis yra toks:

$$\text{Pusėjimo trukmė (sekundės)} = \frac{\ln 2}{k} \qquad [2]$$

Čia ln 2 yra skaičiaus 2 natūrinis logaritmas. Jis lygus 0,693.

O Radono-220 pusėjimo trukmė yra 55,5 s. Naudodamiesi [2] lygtimi apskaičiuokite, kad radono-220 skilimo konstanta lygi 0,0125 s^{-1}.

Skilimo atsitiktinis pobūdis ir eksponentinis dėsnis

Padalijus abi 65 p. [1] lygties puses iš Δt ir perėjus prie ribos, kai šis laiko intervalas artėja prie nulio, ji gali būti pateikta diferencialinės lygties pavidalu:

$$\frac{dN}{dt} = -kN$$

Šiek tiek pertvarkius: $\frac{dN}{N} = -k\,dt$

Suintegravę šią lygtį gauname:

$$\ln N = -kt + A \qquad [3]$$

kur A yra konstanta, o ln žymi natūralųjį logaritmą. Tarkime, iš pradžių turime N_0 radioaktyviųjų branduolių. Kai t lygu nuliui, pagal lygtį:

$$\ln N_0 = A$$

Taigi [3] lygtį galima perrašyti kitaip:

$$\ln N = -kt + \ln + N_0 \qquad [4]$$

Arba: $kt = \ln N_0 - \ln N$

$$kt = \ln\frac{N_0}{N} \qquad [5]$$

Pastaroji lygtis rodo, kad per laiką t radioaktyviųjų branduolių skaičius pakinta nuo N_0 iki N.

Iš šios lygties galima gauti paprastą sąryšį tarp pusėjimo trukmės ir skilimo konstantos, nes pagal apibrėžimą pusėjimo trukmė $t_{1/2}$ yra laiko tarpas, po kurio branduolių skaičius sumažėja du kartus, tai yra nuo N_0 iki $N_0/2$. Įrašę šias reikšmes į lygtį gauname:

$$kt_{\frac{1}{2}} = \ln\frac{N_0}{0,5N_0} = \ln 2$$

Taigi

$$t_{\frac{1}{2}} = \ln 2/k \qquad [6]$$

[4] lygtį galima užrašyti kitokiu pavidalu:

$$\ln N - \ln N_0 = -kt$$

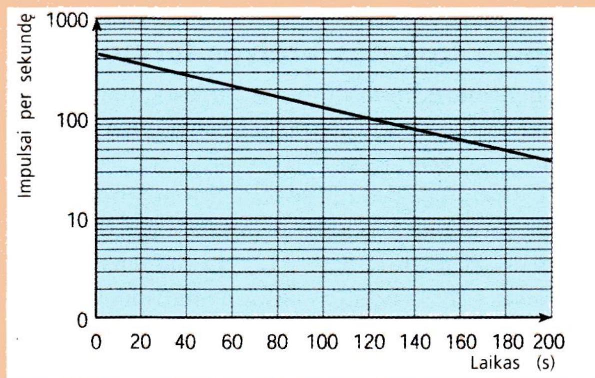
arba $\ln (N/N_0) = -kt$ [7]

Pakeitę logaritmus eksponentėmis gausime:

$$N/N_0 = e^{-kt} \text{ arba } N = N_0e^{-kt}$$

O tai ir yra eksponentinė sąryšio forma.

18.31 pav. skilimo kreivė pateikta logaritminėje skalėje kaip ln N priklausomybė nuo laiko. Iš lygties [7] aišku, kad gautosios tiesės sankirtoje su ln N ašimi bus ln N_0, o jos posvyris yra – k.



18.31 pav. **Radono-220 dujų skilimo kreivė logaritminėje skalėje**

Nukleidai

Terminas **nukleidas** vartojamas įvardyti atomui, nurodant jo branduolyje esančių protonų bei neutronų skaičių. Nukleidai, turintys branduoliuose tiek pat protonų ir *besiskiriantys* tik esančių branduoliuose neutronų skaičiumi, 47 puslapyje buvo pavadinti izotopais.

Kai kurių nukleidų savybės ir pusėjimo trukmės pateiktos 18.6 lentelėje.

18.6 lentelė. **Kai kurių nukleidų skilimo pobūdis ir pusėjimo trukmės**

Nukleidas	Apibūdinimas	Spinduliuotė	Pusėjimo trukmė
Uranas-238	Labiausiai paplitęs urano izotopas	Alfa, gama	$4{,}51\times10^9$ metų
Toris-232	100 procentų torio, aptinkamo Žemėje	Alfa, gama	$1{,}4\times10^{10}$ metų
Radonas-220	Radioaktyviosios dujos, susidarančios skylant toriui-232	alfa	55,5 sekundės
Plutonis-239	Gamtoje jo yra labai nedaug, bet jis susidaro apšaudant uraną neutronais. Linkęs skilti: naudojamas branduoliniuose reaktoriuose ir bombose. Pavojingiausia branduolinių atliekų sudėtinė dalis: itin toksiška ir sunki sandėliuoti, nes turi didelę pusėjimo trukmę.	alfa	24 360 metų
Americis	Susidaro apšaudant neutronais plutonį; dažnai laboratorijose naudojamas kaip alfa dalelių šaltinis.	Alfa, gama	433 metai
Anglis-14	Susidaro iš azoto-14 veikiant kosminiams spinduliams; naudingas organinių medžiagų radioaktyviajam datavimui.	$Beta^-$	5730 metų
Kalis-40	Gamtoje pasitaikantis izotopas (0,12 procentų); svarbiausias kūno foninio spinduliavimo šaltinis	$Beta^-$	$1{,}3\times10^9$ metų
Radis-226	Pirmasis elementas, kurio radioaktyvumas buvo ištirtas (P. ir M. Kiuri, 1898)	Alfa, gama	1622 metai

PAVYZDYS

K Bismuto ($^{212}_{83}Bi$) pusėjimo trukmė yra 60,6 minutės. Kokia yra jo **a)** skilimo konstanta, **b)** koks yra šio nukleido vieno gramo aktyvumas?

Avogadro skaičius lygus $6{,}02 \times 10^{23}$.

A a) Pusėjimo trukmė lygi $(\ln 2)/k$, taigi bismuto skilimo konstanta $k = 0{,}693/(60{,}6 \times 60) = 1{,}91 \times 10^{-4}\ s^{-1}$.

b) 212 gramų bismuto-212 turi $6{,}02 \times 10^{23}$ atomų. Taigi viename grame atomų bus

$$N = (6{,}02 \times 10^{23})/212 = 2{,}84 \times 10^{21}$$

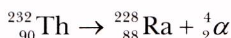
Tikimybė bismutui-212 skilti per 1 sekundę lygi k, todėl viename grame per sekundę vyks kN skilimų, o tai reiškia, kad aktyvumas

$$kN = 1{,}91 \times 10^{-4} \times 2{,}84 \times 10^{21}\ Bq$$
$$= 5{,}4 \times 10^{17}\ Bq$$

■ Žr. 19 klausimą.

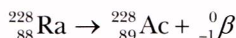
11 KAIP PAKINTA BRANDUOLIAI PO SKILIMO

Branduolys, išspinduliavęs alfa dalelę, praranda du neutronus ir du protonus. Tai reiškia, kad jo masės skaičius sumažėja keturiais, o krūvis, arba atominis numeris, – dviem vienetais. Taigi jis tampa *kitu elementu*. Pavyzdžiui, toris-232, išspinduliavęs alfa dalelę, tampa radžio izotopu:



$$^{232}_{90}Th \rightarrow {}^{228}_{88}Ra + {}^{4}_{2}\alpha$$

Radis-228 po to išspinduliuoja elektroną, t. y. neigiamo krūvio beta dalelę. Jo masės skaičius nepakinta, nes elektrono masė yra labai maža palyginti su nukleono mase. Tokiu atveju vienas neutronas išspinduliuoja elektroną ir virsta protonu. Taigi branduolio krūvis padidėja vienetu ir tampa lygus 89, o tai reiškia, kad naujasis elementas turi tą patį masės skaičių, bet yra jau nebe radis, o aktinis:



$$^{228}_{88}Ra \rightarrow {}^{228}_{89}Ac + {}^{0}_{-1}\beta$$

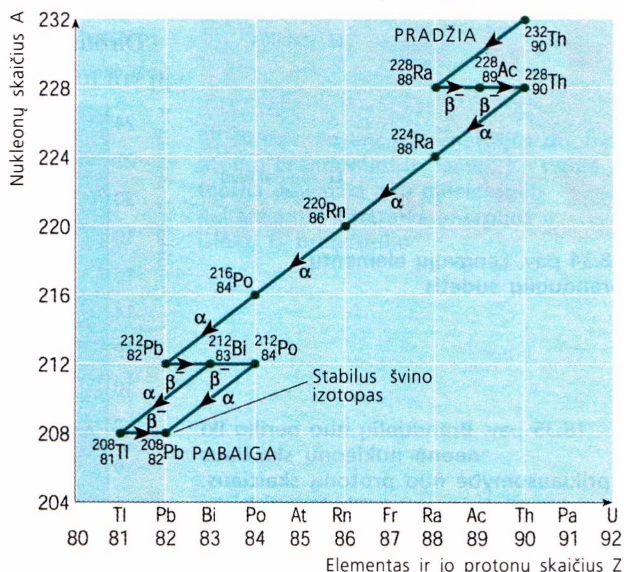
Pavaizduoti pokyčiai yra dvi skirtingos branduolinės reakcijos. Atkreipkite dėmesį, kad abiem atvejais skirtingose lygčių pusėse bendras masės skaičius, kaip ir bendras protonų skaičius, nekinta.

Dauguma randamų Žemėje radioaktyviųjų nukleidų yra susidarę iš didesniųjų branduolių šiems emitavus alfa arba beta daleles. Pastarieji gi yra atsiradę prieš milijardus metų sprogus mirštančiai žvaigždei. Po šio sprogimo kai kurie nukleidai yra išlikę iki šiol, nes jų pusėjimo laikai yra labai dideli, pavyzdžiui:

Torio-232: $1{,}41 \times 10^{10}$ metų
Urano-238: $4{,}51 \times 10^{9}$ metų
Urano-235: $7{,}1 \times 10^{8}$ metų

Šių nukleidų, taip pat jų „dukterinių branduolių" (18.32 pav.) skilimai išskiria energiją, palaikančią Žemės viduje aukštą temperatūrą, pakankamą išlydyti ten esančioms medžiagoms (žr. 23 skyrių).

18.32 pav. **Torio skilimo seka**

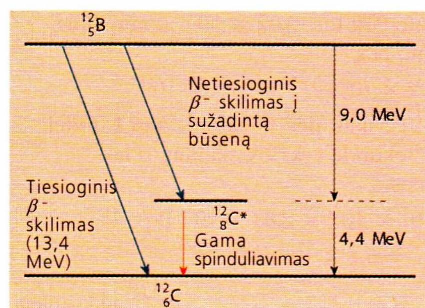


?

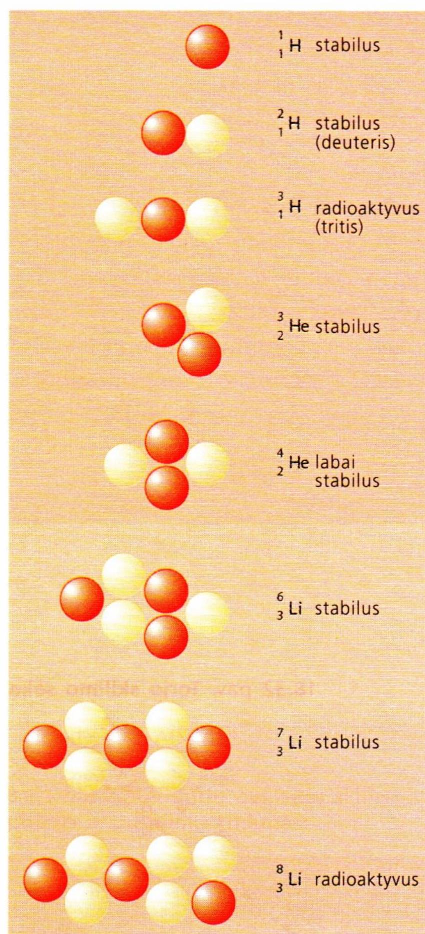
P Paaiškinkite, kodėl:

a) toris-232, išspinduliavęs alfa dalelę, virsta radžiu-228,

b) radis, išspinduliavęs beta dalelę (β⁻), tampa aktinio izotopu.



18.33 pav. **Gama skilimas įvyksta, kai branduolys susidaro esant sužadintai būsenai. Tokia būsena žymima kaip ir pats branduolys, tik su žvaigždute viršutiniame dešiniajame kampe, t. y. $^{12}_{6}C^*$**



18.34 pav. **Lengvųjų elementų branduolių sudėtis**

Gama spinduliavimas

Gama spindulius sudaro labai trumpų bangų ilgių elektromagnetinės spinduliuotės fotonai. Jų bangų ilgiai apytiksliai lygūs 10^{-13} m, t. y. jų bangos ilgis 1000 kartų trumpesnis už rentgeno spindulių bangų ilgį, o jų fotonų energijos maždaug dešimt milijonų kartų didesnės už šviesos fotonų energijas.

Pabandykime paprastai paaiškinti, kodėl branduoliai spinduliuoja fotonus. 18.33 pav. parodyta, kad boro-12 branduolys, išspinduliavęs elektroną (beta spindulius), kartais pavirsta ne pagrindinės, bet sužadintos būsenos anglies-12 branduoliu. Tai reiškia, kad vykstant beta skilimui, nukleonai branduolyje susižadina. Tokiu atveju į pagrindinę būseną branduolys grįžta išspinduliavęs fotoną. Analogiški procesai gali vykti taip pat ir alfa skilimo metu.

Šis procesas panašus į mūsų jau nagrinėtą mažų energijų fotonų emisiją atomų elektronams peršokant iš sužadintų lygmenų į mažiau sužadintus, kol atomas grįžta į pagrindinę būseną. Gama fotono, kurį spinduliuoja branduolys, energija yra daug didesnė už energiją fotono, kurį išspinduliuoja sužadintasis atomas, nes branduolinės nukleonų sąveikos jėgos yra kur kas stipresnės už elektromagnetines jėgas, išlaikančias atomuose elektronus.

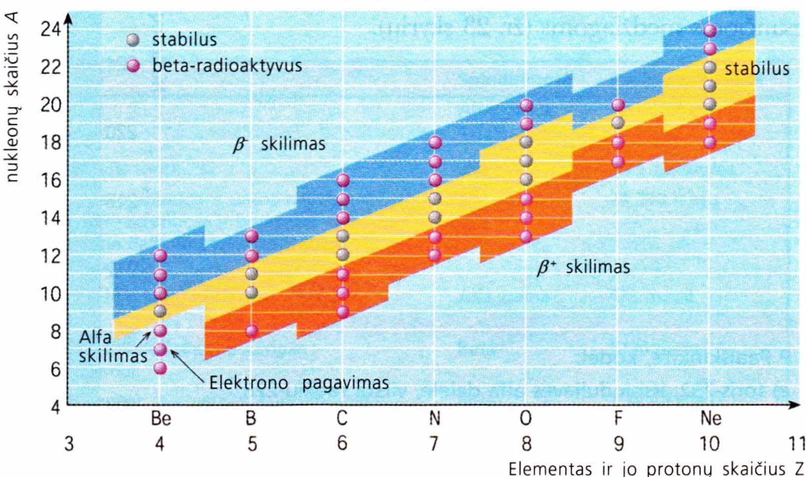
Branduolių stabilumas, arba kas sąlygoja radioaktyvųjį skilimą?

Tai nėra paprastas klausimas. Kaip prisimenate, branduoliuose varžosi dvi jėgos – **elektrinės stūmos** tarp protonų ir **stiprioji branduolinė** artisiekė **traukos** jėga, kuria veikia vienas kitą visi nukleonai. Kad branduolys išliktų stabilus, suminė traukos jėga, veikianti bet kurį nukleoną, turi būti didesnė už jį veikiančią suminę stūmos jėgą. Įdomiausia tai, kad netgi tais atvejais, kai ši sąlyga neįvykdyta, nestabilus branduolys tuoj pat nesuskyla, tačiau kvantiniame pasaulyje, kur neapibrėžtumai ir tikimybės yra įprastas dalykas, tai neturėtų stebinti.

Lengviausiųjų branduolių sudėtis parodyta 18.34 pav. Atkreipkite dėmesį – kai kurie jų yra nestabilūs.

Papildomo neutrono atsiradimas branduolyje turi padidinti jo stabilumą, nes neutronas prideda traukos jėgų, nepridėdamas stūmos. Šį reiškinį galima stebėti 18.35 pav., kadangi didėjant stabiliųjų branduolių protonų skaičiui, kartu didėja ir jų neutronų skaičius.

Dirbtiniai branduoliai gali susidaryti pridėjus neutronų, bet dauguma jų yra tokie radioaktyvūs, kad jų pusėjimo trukmės matuojamos sekun-



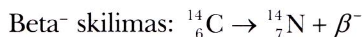
18.35 pav. **Branduolių nuo berilio iki neono nukleonų skaičiaus priklausomybė nuo protonų skaičiaus. Kiekvienas vertikalus stulpelis sudarytas iš to paties elemento izotopų**

dėmis. Taigi tam, kad išliktų stabilūs, branduoliai turi turėti tik tiek, kiek reikia – nei per mažai, nei per daug neutronų.

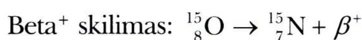
Beta skilimas

Skylant branduoliui, beveik visada spinduliuojami beta spinduliai. Kartais beta dalelė būna elektronas, beta⁻, tačiau kai kurie nestabilūs branduoliai skildami spinduliuoja teigiamo krūvio beta daleles, beta⁺. Šis procesas vadinamas **teigiamuoju beta skilimu**; spinduliuojamoji dalelė yra teigiamo krūvio elektronas, vadinamas **pozitronu**.

Taigi, jei kokiame branduolyje yra per daug neutronų, vienas jų pavirsta protonu beta⁻ skilimo metu; jei neutronų per mažai, protonas virsta neutronu, ir vyksta beta⁺ skilimas:



Beta⁻ skilimas: $^{14}_{6}C \rightarrow ^{14}_{7}N + \beta^-$



Beta⁺ skilimas: $^{15}_{8}O \rightarrow ^{15}_{7}N + \beta^+$

Stabiliuose branduoliuose yra jautrus balansas tarp neutronų ir protonų skaičiaus. Pažvelkite dar kartą į 18.7 pav. (47 p.), kur matote stabiliausiojo kiekvieno elemento izotopo neutronų ir protonų skaičiaus santykį. Po dantyto, nesklandaus starto šis santykis didėjant branduoliams lėtai auga. Sunkiausiesiems elementams atsiranda kitas nestabilumo mechanizmas – jie linkę skilti į mažesnius branduolius ir prasideda dalijimasis (žr. 49 p.).

Dar viena gamtos jėga – silpnoji

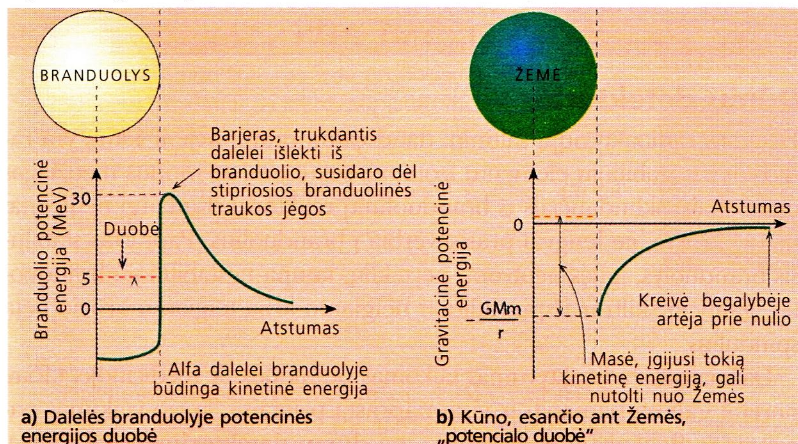
Paprasčiausias būdas paaiškinti beta skilimą, vykstantį branduoliuose su neoptimaliu neutronų ir protonų skaičiaus santykiu, yra ketvirtosios gamtos sąveikos – **silpnosios branduolinės sąveikos** – įvedimas. Ši jėga natūraliai pritampa prie jau žinomų gravitacinės, elektromagnetinės ir stipriosios branduolinės jėgų. Plačiau apie ją rasite 26 skyriuje.

Alfa skilimas

Dalelę branduolyje galime įsivaizduoti kaip parimusią potencialo duobės dugne, panašiai kaip kokį daiktą, nukritusį ant Žemės paviršiaus (18.36 pav.). Abiem atvejais reikia energijos, norint tą dalelę ar kūną iš potencialo duobės iškelti.

Alfa dalelė yra stabilus helio atomo branduolys, o alfa skilimas vyksta dideliuose nestabiliuose branduoliuose. Kaip ji gali „išlėkti“ iš šios duobės? 18.36a) pav. matyti, kad jai reikia suteikti kinetinės energijos.

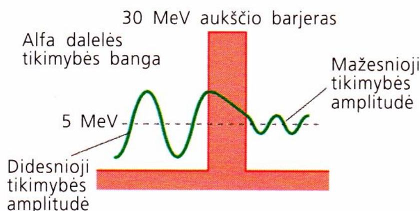
Kiekviena dalelė branduolyje visada turi šiek tiek kinetinės energijos – jos gali būti įsivaizduojamos kaip žiogeliai, straksintys gilioje dėžėje – bet jos nepakanka tai dalelei iš branduolio „ištrūkti“.



a) Dalelės branduolyje potencinės energijos duobė

b) Kūno, esančio ant Žemės, „potencialo duobė“

18.36 pav. Potencinės energijos duobės atomo branduoliui ir Žemei. Klasikinė teorija neleidžia alfa dalelei įgyti pakankamai kinetinės energijos ir išlėkti iš branduolio

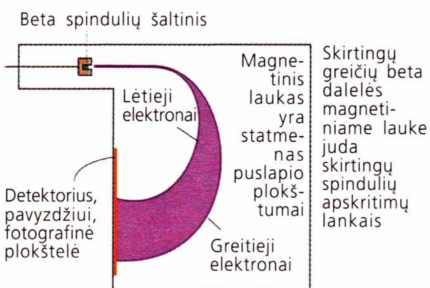


18.37 pav. **Kvantinė alfa skilimo teorija: tuneliavimo reiškinys leidžia alfa dalelei, kurios kinetinė energija yra tik 5 MeV, būti ir branduolio išorėje. Tai nebūtinai įvyksta, todėl radioaktyvusis skilimas ir yra atsitiktinis**

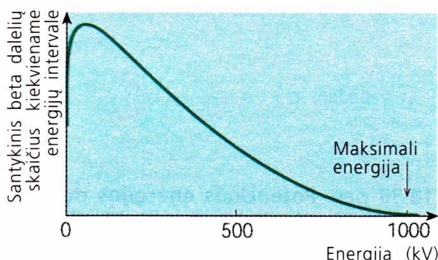
Žr. 17 skyrių „Atomai, spektrai ir kvantai", kur yra daugiau medžiagos apie kvantinę fiziką ir tikimybės bangas.

18.7 lentelė. **Spinduliuotės ir jėgos**

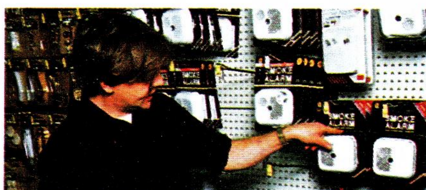
Skilimas	Vyraujanti jėga
Alfa skilimas	Stiprioji branduolinė
Beta skilimas	Silpnoji branduolinė
Gama skilimas	Elektromagnetinė



18.38 pav. **Eksperimentas su grynojo šaltinio beta spinduliuote, iš kurio aiškėja, kad atsirandančių skilimo metu elektronų greičiai yra skirtingi**



18.39 pav. **Bismuto-210 beta dalelių spektras. Neutrino buvimas paaiškina, kodėl tiek daug dalelių turi energiją, mažesnę nei maksimali**



18.40 pav. **Kiekvienoje patalpoje gali būti dūmų detektorius**

Alfa skilimui paaiškinti tenka naudotis kvantine teorija. Tik ši teorija leidžia alfa dalelei tuneliuoti per potencinės duobės sienelę, kaip tai parodyta 18.37 pav.

Šioje teorijoje alfa dalelė gali būti vaizduojama tikimybės banga, esančia branduolio viduje. Tačiau, kaip matome paveiksle, ši banga nesibaigia prie *vidinės* branduolio potencinės energijos barjero ribos; egzistuoja, nors ir maža, bet nelygi nuliui tikimybė, kad alfa dalelė gali būti ir branduolio išorėje. Jai pakliuvus į branduolio išorę, elektrinės stūmos jėga suteikia jai papildomos kinetinės energijos, pakankamos nuskrieti kiek norint toli nuo branduolio.

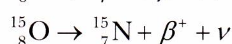
Radioaktyviosios spinduliuotės ir veikiančių branduoliuose jėgų sąryšis parodytas 18.7 lentelėje.

Energijos tvermė ir beta skilimas – neutrinas

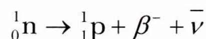
Alfa dalelės ar fotonai, atsirandantys skylant radioaktyviajam branduoliui, turi tam nukleidui būdingas tam tikras energijas. Beta dalelėms ši taisyklė negalioja; jų energijos nėra apibrėžtos – jos pasiskirsto gana plačiame intervale (18.38 ir 39 pav.).

Šis beta dalelių energijų neapibrėžtumas buvo savo laiku sunki mįslė. Iš pirmo žvilgsnio gali pasirodyti, kad skilimo metu pažeidžiamas energijos tvermės dėsnis. Volfgangas Paulis pirmasis pasiūlė išspręsti problemą taręs, kad beta skilimo metu gimsta dar viena, *nauja*, iki tol nežinota atomo dalelė. Tos dalelės masė turėtų būti labai maža, o krūvis lygus nuliui, nes tik turėdama tokias savybes ji, įgyjanti skilimo metu gana dideles energijas, būtų galėjusi taip meistriškai ir ilgai nuo fizikų „slapstytis". Ši naujoji dalelė buvo pavadinta „mažuoju neutronu" arba **neutrinu** ir pažymėta graikų raidyno raide ν (niu). Dabar jau gerai žinoma, kad egzistuoja net trys neutrinų rūšys, ir kiekvieno jų masė yra labai maža, o gal net lygi nuliui. Taigi beta skilimo reakcijos, pateiktos 69 p., turi būti perrašytos taip:


$$^{14}_{6}C \rightarrow {}^{14}_{7}N + \beta^- + \bar{\nu}$$


$$^{15}_{8}O \rightarrow {}^{15}_{7}N + \beta^+ + \nu$$

Šiose lygtyse ν yra „paprastas" neutrinas, o $\bar{\nu}$ – žymi jo antidalelę, vadinamą antineutrinu. Skylant neutronui, atsiranda būtent antineutrinas:


$$^{1}_{0}n \rightarrow {}^{1}_{1}p + \beta^- + \bar{\nu}$$

26 skyriuje plačiau aptarsime dalelių ir antidalelių savybes.

13 RADIOAKTYVUMO NAUDA IR KELIAMI PAVOJAI

Dūmų detektorius

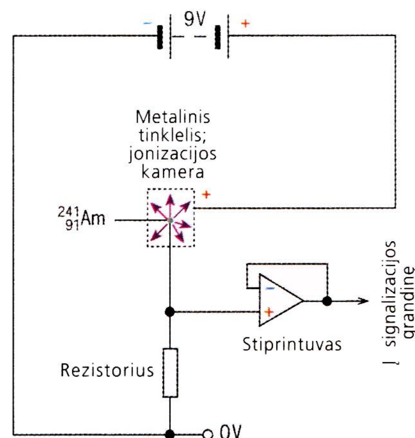
Daugelis radioaktyviųjų šaltinių, naudojamų pramonėje ir kitur, yra radioaktyvūs stabiliųjų elementų izotopai, sukuriami apšvitinus medžiagas neutronais, sklindančiais iš branduolinių reaktorių. Kadangi neutronai neturi krūvio, jie lengvai prasiskverbia į branduolius. Paprastas stabilusis branduolys, įgijęs neutronų perteklių, tampa nestabiliuoju branduoliu, galinčiu skilti ir išspinduliuoti neigiamo arba teigiamo krūvio beta spindulius.

Dažniausiai radioaktyvumas taikomas pramonėje ir medicinoje, tačiau neretai galima pamatyti ir visai paprastą prietaisą, kurio veikimas pagrįstas radioaktyvumo reiškiniu – tai **dūmų detektorius** (18.41 pav.).

Jame naudojami nedideli kiekiai radioaktyvaus elemento americio-241 ($^{241}_{95}Am$), kurio pusėjimo trukmė lygi 433 metams. Nedideli jo kiekiai randami urano rūdoje, o praktiškai jis gaminamas apšvitinus plutonį neutronais iš branduolinio reaktoriaus.

Americis-241 skyla spinduliuodamas alfa daleles. Dūmų detektoriuje stabilūs šių alfa dalelių srautai susiduria su oro molekulėmis ir jas jonizuoja. Atsiradę jonai juda link elektrodų, sukurdami grandinėje silpną nuolatinę srovę. Dūmų dalelės, susidarančios degant medžiagoms, yra daug didesnės už oro molekules, todėl jos yra daug aktyviau veikiamos alfa dalelių, todėl atsiradusios sukelia grandinėje kur kas stipresnę srovę. Srovei padidėjus elektronika įjungia signalizacijos sistemą.

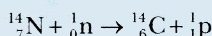
Apie radioaktyvumo panaudojimą medicinoje sužinosite 24 skyriuje.



18.41 pav. **Dūmų detektoriaus veikimas**

DATAVIMAS ANGLIMI

Atmosferoje esantį anglies dioksidą augalai vartoja sudarydami pagrindines savo struktūras – šaknis, kamienus, šakas, lapus bei sėklas. Atmosferoje randama anglis susideda iš 98,89 procentų anglies-12 ir 1,11 procentų anglies-13 izotopų mišinio. Radioaktyviojo izotopo anglies-14, kurio pusėjimo trukmė yra 5730 metų, atmosferoje aptinkami tik pėdsakai, nors jis nuolatos susidaro didelių energijų kosminiams spinduliams susiduriant su atmosferoje esančių elementų branduoliais. Skildami šie branduoliai išspinduliuoja neutronus, kurie, susidūrę su azoto branduoliais, gali išmušti iš jų protonus, ir priversti susidaryti šio radioaktyvaus izotopo branduoliams. Procesas užrašomas taip:



$$^{14}_{7}N + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{14}_{6}C + ^{1}_{1}p$$

Ši anglis, kaip įprasta, jungdamasi su deguonimi, sudaro dioksidą CO_2. Abu dioksidai – ir $^{12}CO_2$, ir $^{14}CO_2$, augalams vienodai priimtini ir yra vienodai gerai įsisavinami. Taigi augalų anglies hidratuose abu anglies izotopai sutinkamai tokios koncentracijos, kuri atitinka jų koncentraciją atmosferoje. Šis santykis išlieka pastovus ir gyvūnų, kurie tais augalais minta, audiniuose.

Augalui nustojus vegetuoti, anglies-14 koncentracija, buvusi atmosferoje, toliau nebepalaikoma, ir pradeda tolydžio mažėti, nes šie branduoliai, skirtingai nuo kitų izotopų – anglies-12 ar anglies-13, suskilę išnyksta. Dėl to anglies-14 ir anglies-12 koncentracijų santykis medžio, nupjauto prieš keletą šimtmečių, gabale, bus pakitęs, ir pagal jį galima spręsti, prieš kiek metų tai atsitiko.

Nupjauto medžio gabalo aktyvumas dėl anglies-14 yra 250 s^{-1}. Tarkime, tokios pat masės medienos gabalas, paimtas iš kokio seno pastato, yra 125 s^{-1}. Tai reikštų, kad jo amžius turėtų būti lygus to izotopo pusėjimo trukmei, t. y. 5730 metų. Apskritai jei ką tik nupjauto medžio aktyvumas yra A_0, tai praėjus laikui t, jo aktyvumas bus $A = A_0 e^{-kt}$, kur k yra anglies-14 skilimo konstanta.

Pavyzdžiui, jei pamatuotas A lygus 50 $s^{-1} \cdot kg^{-1}$, tai pagal formulę gausime:

$$50 = 250 \times e^{-kt} = \frac{250}{e^{kt}}$$

arba: $e^{kt} = 5$

Iš čia gauname, kad $kt = \ln 5 = 1{,}61$

Pusėjimo trukmė, lygi 5730 metų, reiškia, kad skilimo konstanta lygi ln 2/5730, tai yra, pavyzdėlio amžius lygus

$$t = \frac{1{,}61}{k} = 5730 \times \frac{1{,}61}{0{,}693} = 13300 \text{ metų}$$

Datavimas anglimi nėra labai tikslus būdas amžiui nustatyti. Spinduliuojamų beta dalelių energijos yra nedidelės, todėl kai kurios jų sugeriamos ir į skaitiklį nepatenka. Norint tiksliau išmatuoti, maži tiriamos medžiagos pavyzdėliai yra išgarinami. Deja, jei pavyzdėlis nedidelis, paklaida skaičiuojant šiuos retus skilimo aktus, ypač jei medžiagos akyvumas mažas, taip pat gana didelė.

Datavimo augimui metodas grindžiamas tuo, kad kosminių spindulių aktyvumas nekinta tūkstančius metų, tačiau iš tikrųjų taip nėra. Norint į tai atsižvelgti, radioaktyviosios anglies duomenis reikia kalibruoti. Tam pasitelkiamos tam tikros rūšies Kalifornijoje augančios pušys, kurių amžius yra keletas tūkstančių metų. Šiuo metu didžiausias datavimo tikslumas, kuris, kai pavyzdėlio amžius yra nuo 600 iki 10 000 metų, sudaro plius minus 200 metų.

Šiaip ar taip, datavimas anglimi yra tiksliausias žinomas šiuo metu datavimo metodas. Jis labai padeda archeologams, geologams ir planetologams. Didesniems periodams matuoti specialistai naudoja ir kitus ilgai gyvuojančius izotopus (išsamiau žr. 27 skyriuje).



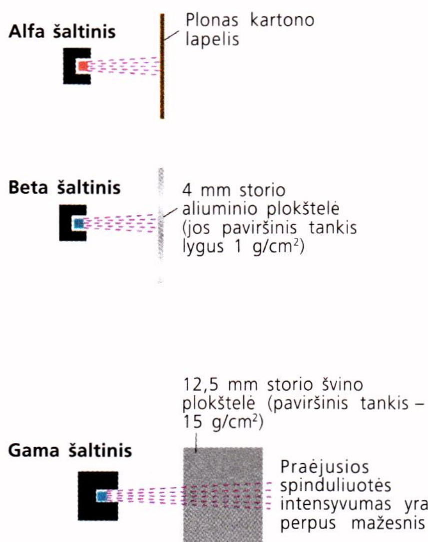
18.42 pav. **Kalifornijos pušis, gerai žinoma visur pasaulyje, nes yra naudojama kalibruoti datavimo radioaktyviąja anglimi duomenimis**



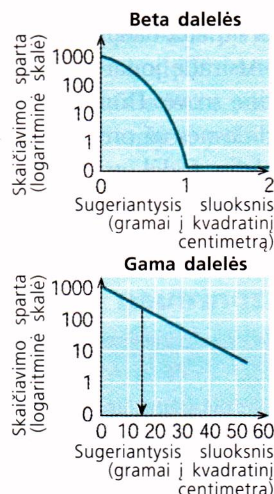
18.43 pav. **Tiriamoji medžiaga sudeginama ir taip tiksliau nustatomi anglies-12 ir anglies-14 koncentracijų santykiai**

Žr. 21 klausimą.

Jonizuojančiosios spinduliuotės keliami pavojai



18.44 pav. **Apsauga nuo jonizuojančiosios spinduliuotės**



Gyvosios ląstelės sudarytos iš sudėtingų molekulių, kurios, paveikus radiacijai, lengvai suyra. Pačios svarbiausios šiuo požiūriu yra DNR ir RNR molekulės. Jos valdo proteinų ir enzimų, kontroliuojančių visų biocheminių medžiagų, būtinų lastelių reprodukcijai ir augimui, gamybą.

Alfa spinduliai pavojingi, nes jų jonizuojantysis poveikis yra pats stipriausias ir todėl labiausiai ardo ląsteles. Kita vertus, dėl tos pačios priežasties alfa spinduliai lengvai sugeriami bet kokioje aplinkoje: ore jie plinta tik keletą centimetrų, o apsaugai užtenka net plono popieriaus lapelio (18.44 pav.).

Žr. 22 klausimą. ■

Beta dalelės mažiau jonizuoja, todėl ir jų siekis didesnis. Patekę į kūną, jie gali giliau įsiskverbti. Kiekvienas, dirbantis su beta spindulių šaltiniais, privalo dėvėti specialius apsaugančius rūbus.

Gama spinduliuotė jonizuoja mažiausiai, tačiau yra pati skvarbiausia, todėl apsisaugoti nuo jos labai sudėtinga.

Biologinio poveikio matavimas

Radioaktyviosios spinduliuotės įvairovė, skirtinga įvairių jos rūšių prasiskverbimo ir jonizacijos geba – visa tai rodo, kad išmatavus šaltinio aktyvumą toli gražu dar sunku spręsti, kiek pavojingas gyvajam organizmui yra tas spinduliavimas. Šiuo požiūriu tinkamesnis rodiklis yra energija, kurią jonizuojančioji spinduliuotė praranda plisdama aplinkoje, kadangi šis rodiklis būtent ir nusako jonizacijos, pražūtingos gyvam organizmui, laipsnį.

Audinio sugerta energija matuojama **dozės** vienetais – **grėjais** (Gy), lygiais džauliui į kilogramą:

$$1\ \text{Gy} = 1\ \text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Norint atsižvelgti dar ir į spinduliuotės jonizuojantįjį poveikį, dozė dauginama iš spinduliuotės **intensyvumo koeficiento**, kuris rentgeno bei gama spinduliams ir beta dalelėms lygus vienetui, o alfa dalelėms lygus 20. Ši sandauga yra vadinama **dozės ekvivalentu** ir matuojama **zivertais** (Sv).

Anksčiau vartoti dar ir tokie vienetai:

$$\text{Kiuris} = 3{,}7 \times 10^{7}\ \text{Bq}$$

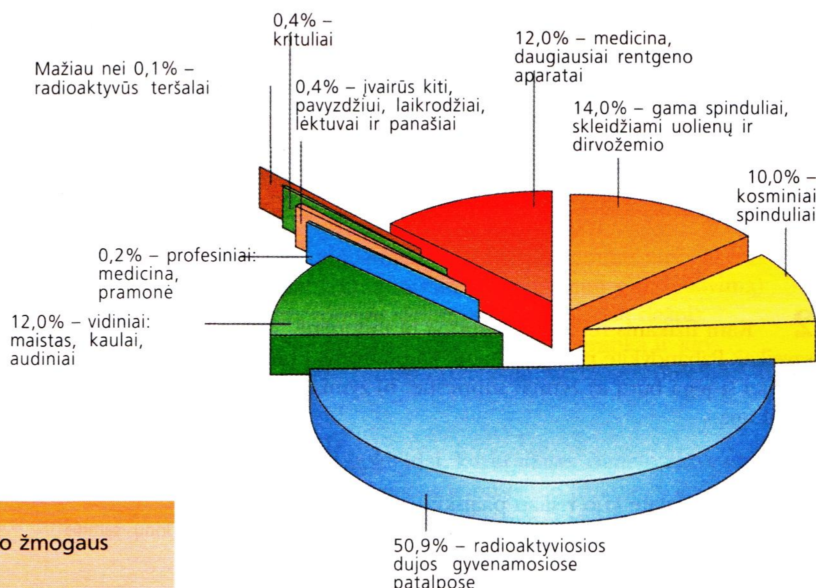
18.8 lentelė. **Vienetai, susiję su radioaktyvumu**

Parametras	Vienetas	Apibrėžimas
Aktyvumas	Bekerelis (Bq)	Skilimo sparta, matuojama skilimo aktais per sekundę
Dozė	Grėjus (Gy)	Pavyzdėlio sugerta energija, matuojama džauliais į kilogramą
Dozės ekvivalentas	Zivertas (Sv)	Galimo poveikio pavyzdėliui matas, lygus dozės ir spinduliuotės intensyvumo koeficiento sandaugai

Radas = 0,001 Gy
Remas = 0,001 Sv

Radioaktyvioji rizika

Vidutinė ekvivalentinė dozė, gaunama iš foninio spinduliavimo, yra lygi 2.6 ziverto per metus. Jos sudėtis ir šaltiniai parodyti 18.45 pav..



18.45 pav. **Būdingi foninės spinduliuotės šaltiniai ir jos sudėtis (procentais)**

?

K a) Kodėl gama spinduliuotė mažiau ardo žmogaus kūną palyginti su alfa spinduliais?

b) Kodėl dirbančiųjų apsaugai nuo gama spinduliuotės skiriama daug daugiau dėmesio negu apsaugai nuo alfa spindulių?

SANTRAUKA

Šiame skyriuje susipažinote su **atomo branduolių savybėmis ir jų struktūra**. Jūs turėtumėte:

- Žinoti, kad atomų branduoliai sudaryti iš dviejų rūšių nukleonų – teigiamo krūvio protonų ir neturinčių krūvio neutralių neutronų.
- Žinoti, kad branduolio protonų skaičius lygus jo atominiam skaičiui *Z*, o masės skaičius *A* lygus nukleonų skaičiui, t. y. protonų ir neutronų skaičiaus sumai.
- Žinoti, kad branduoliai yra stabilūs tik esant gana jautriam neutronų ir protonų skaičiaus balansui.
- Žinoti, kad to paties elemento branduoliai turi tą patį protonų skaičių, bet gali skirtis neutronų skaičiumi (izotopai).
- Žinoti, kad nukleonus branduoliuose išlaiko stiprioji branduolinė sąveika, gi protonai dėl vienodo krūvio stumia vienas kitą.
- Suprasti, kad šios jėgos sukuria neigiamą potencinę energiją (ryšio energiją), kuri stebima kaip masės sumažėjimas (masės defektas).
- Suprasti, kad branduolių reakcijos, tokios kaip dalijimasis ar sintezė, sukelia jų sudėtinių dalių potencinės energijos pokyčius; taigi kai kurios reakcijos gali būti panaudojamos energijai (branduolinei energijai) gauti.
- Galėti komentuoti ryšio energijos vienam nukleonui kreivę.
- Žinoti, kaip paprastas lašo modelis aiškina branduolių dalijimąsi.
- Žinoti, kaip energija išsiskiria dalijimosi ar sintezės metu ir suprasti branduolinės energijos privalumus ir trūkumus.
- Žinoti, kaip veikia masių spektrografas.

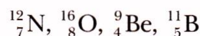
Jūs taip pat susipažinote su **radioaktyvumo** reiškiniu, sužinojote, kad nestabilūs branduoliai yra radioaktyvūs, ir todėl galite:

- Žinoti jonizuojančiosios spinduliuotės, kurią skleidžia radioaktyviosios medžiagos, savybes.
- Žinoti, kaip ši spinduliuotė stebima ir matuojama (Vilsono kamera, Geigerio skaitiklis ir kt.).
- Žinoti radioaktyvumo šaltinius (taip pat ir foninius) ir jų ypatumus.
- Žinoti, kad aktyvumas eksponentiškai mažėja, o šio kitimo charakteristika yra duotojo nukleido pusėjimo trukmė.
- Žinoti, kaip tą pusėjimo trukmę rasti iš aktyvumo kreivės.
- Žinoti, kad skilimas yra atsitiktinis procesas, nusakomas dalijimosi tikimybe.
- Gebėti matematiškai aprašyti dalijimosi procesą naudojantis skilimo konstanta.
- Žinoti, kas atsitinka dalijantis branduoliui ir suvokti radioaktyviųjų sekų priežastis.
- Suprasti radioaktyviojo skilimo priežastis ir tokių procesų, kaip alfa, beta plius, beta minus ir gama, teoriją bei suvokti, kaip buvo atrastas neutrinas.
- Žinoti radioaktyviųjų šaltinių ir jų spinduliuotės naudą ir keliamus pavojus.

KLAUSIMAI

Branduolys

1 Nupieškite diagramas, iliustruojančias šių nukleidų sudėtį:


$^{12}_{7}N$, $^{16}_{8}O$, $^{9}_{4}Be$, $^{11}_{5}B$

2 Kam fizikams reikalinga stiprioji branduolinė sąveika? Pabandykite pasamprotauti, kaip atrodytų branduoliai, jei ši jėga būtų **a**) žymiai silpnesnė, **b**) žymiai stipresnė už tikrąją.

3 Pabandykite kuo rišliau paaiškinti, kodėl sunkieji branduoliai yra linkę būti nestabilūs.

4 Deuterio branduolys gali susidaryti vykstant sintezės reakcijai susijungus protonui su neutronu.

a) Kodėl šios dviejų dalelių sistemos potencinė energija yra *mažesnė*, nei dviejų nutolusių dalelių potencinė energija?

b) Deuterio branduolio masė yra mažesnė už sudarančių jį nukleonų masių sumą. Kodėl?

5 Naudodamiesi žemiau pateiktais duomenimis apskaičiuokite:

a) deuterio masės ir neutrono bei protono masių sumos skirtumą.

b) deuterio ryšio energiją **(i)** džauliais, **(ii)** elektronvoltais.

Duomenys: protono masė $1{,}672\ 623 \times 10^{-27}$ kg;
neutrono masė $1{,}674\ 927 \times 10^{-27}$ kg;
deuterio branduolio masė $3{,}344\ 497 \times 10^{-27}$ kg;
$1\ \text{eV} = 1{,}602\ 177 \times 10^{-19}$ J.

6 Naudodamiesi ryšio energijos vienam nukleonui sąvoka ir 18.11 pav. pateikta šios energijos priklausomybe nuo nukleonų skaičiaus, paaiškinkite, kodėl energija išlaisvinama tik *jungiantis* lengviesiems arba *dalijantis* sunkiesiems branduoliams.

7 Uranas-235 gali savaime skilti į du mažesnius branduolius, molibdeną-94 ir cezį-139, dar išsilaisvinant ir dviem neutronams. Įvertinkite šios reakcijos metu gaunamą energiją, naudodamiesi pateiktais duomenimis:

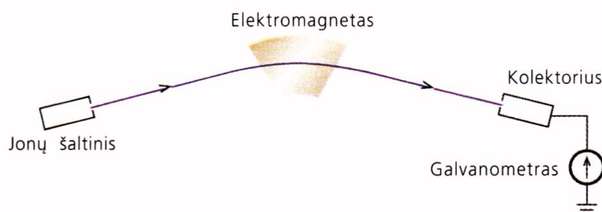
	Cs-139	Mo-94	U-235
Ryšio energija (MeV)	−1160	−814,3	−1784

8 Masių spektrografe (53 p.) pagaminamas vieną kartą jonizuotų neono atomų pluoštelis. Neoną sudaro trys izotopai, jų masių skaičiai A yra 20, 21 ir 22. Jonų greičiai yra nuo 4,8 iki $5{,}1 \times 10^{-7}$ m/s.

a) Elektrinis laukas greičių selektoriuje lygus $1{,}00\ \text{N} \cdot \text{C}^{-1}$. Koks magnetinis laukas reikalingas tam, kad visi jonai pasiektų nukreipimo kamerą judėdami $5{,}00 \times 10^{7}$ m/s greičiu?

b) Magnetinis laukas, naudojamas izotopams atskirti, lygus 1,00 T. Apskaičiuokite apskritimų, kuriais juda kiekvienas izotopas, spindulius. (Naudokitės vidutine nukleono mase, lygia $1{,}66 \times 10^{-27}$ kg ir imkite $e = 1{,}60 \times 10^{-19}$ C).

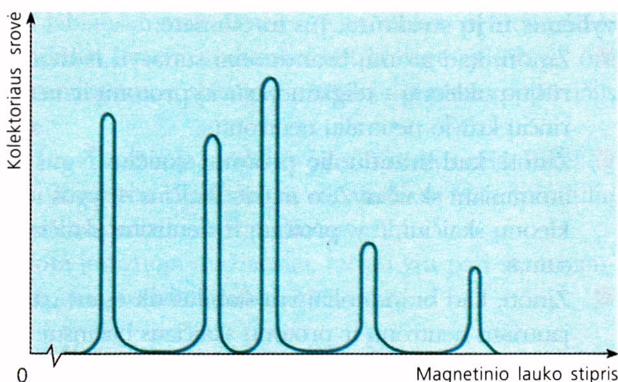
9 Panagrinėkime ksenono izotopų atskyrimą magnetiniame lauke.



18.K9a) pav.

Schemoje parodytos paprasto masių spektrometro dalys. Jonai, kurių kiekvieno krūvis yra q, pagreitinami ir išskrieja iš šaltinio kaip siauras pluoštelis. Elektromagnetas juos nukreipia į kolektorių. Atsirandanti kolektoriuje srovė matuojama galvanometru.

a) Kodėl jono trajektorija magnetiniame lauke yra apskritimo lankas?



18.K9b) pav.

18.K9b) pav. parodyta kolektoriaus srovės priklausomybė nuo magnetinio lauko stiprio.

b) Kaip įmanoma atskirti įvairių masių jonus nejudinant nei šaltinio, nei kolektoriaus?

c) Kokia fizikinė prasmė dydžių, esančių formulių kairėje ir dešinėse pusėse:
Masės m jonas, pagreitintas potencialų skirtumu V, turi

$$\frac{1}{2}mv^2 = qV$$

Jam judant magnetiname lauke B spindulio R lanku

$$BqV = mv^2/R$$

d) Įrodykite, kad B reikšmė, reikalinga izotopui nukreipti į kolektorių, proporcinga kvadratinei šakniai iš m.

e) 18.K9b) pav. pažymėkite, kuri savaitė atitinka **(i)** sunkiausiąjį, **(ii)** labiausiai paplitusį ksenono izotopą. Paaiškinkite, kodėl.

10 Protonų, pagreitintų iki 15 MeV energijos, pluoštelis atsitrenkia į sidabro foliją. Tarkime, koks nors protonas susiduria su sidabro branduoliu kaktomuša. Kiek jis gali priartėti prie branduolio centro? Duomenys: $e = 1{,}60 \times 10^{-19}$ C, sidabro Z lygus 47.

11 Aukso branduolio spindulys yra apytikriai lygus $8{,}0 \times 10^{-15}$ m. Jis sudarytas iš 197 nukleonų, kurių kiekvieno masė yra $1{,}67 \times 10^{-27}$ kg.

a) Įrodykite, kad aukso branduolio tūris apytiksliai lygus 2×10^{-42} m^3.

b) Apskaičiuokite branduolinės materijos tankį.

12 Kad prasiskverbtų į branduolį, protonai turi būti pagreitinti iki didelių energijų, tuo tarpu netgi nedidelių energijų neutronai lengvai į jį prasiskverbia. Paaiškinkite šiuos reiškinius.

Radioaktyvumas

13 Kas tai yra foninis spinduliavimas ir jo sparta?

14

a) Kas vadinama radioaktyviojo šaltinio *aktyvumu*?

b) Koks skirtumas tarp aktyvumo ir skilimo spartos?

15 Radioaktyviojo šaltinio skilimo sparta (impulsų dažnis) prasidedant eksperimentui yra 2600 1/s, o jo pusėjimo trukmė lygi 2 valandoms.

a) Koks impulsų dažnis tikėtinas **(i)** po 4 valandų, **(ii)** po 24 valandų.

b) Kuri šių verčių labiau tikėtina stebėti realiai eksperimentuojant su tokiu šaltiniu?

16 Radioaktyvaus nukleido skilimo konstanta yra $0{,}0025$ s^{-1}.

a) Koks būtų aktyvumas (Bq) šaltinio, turinčio 6×10^{14} nukleidų?

b) Kokia šio nukleido pusėjimo trukmė?

17 Nežinoma radioaktyvi medžiaga laboratorijoje, kurioje išmatuotas radiometru foninis spinduliavimas siekia 4 blyksnius kas 10 s, skyla lentelėje nurodyta sparta.

Laikas	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100
Blyksnių skaičius per 10 s	600	445	340	248	188	142	110	82	63	47	36	28

a) Naudodamiesi lentelės duomenimis nustatykite patikslintą (atsižvelgiant į foninį spinduliavimą) medžiagos skilimo spartą (impulsų dažnį).

b) Nubraižykite skilimo spartos grafiką ir juo naudodamiesi nustatykite medžiagos pusėjimo trukmę.

18 Kodėl nukleidai, kurių masės vieneto aktyvumas yra didesnis, turi trumpesnę pusėjimo trukmę, palyginus su nuklidais, kurių aktyvumas masės vienetui yra mažesnis?

19

a) Įrodykite, kad 1 mg masės švino-212 bandinyje yra 3×10^{18} atomų. Avogadro skaičius lygus $6{,}3 \times 10^{23}$ moliui.

b) Pamatavus Geigerio skaitikliu šio bandinio aktyvumą gauta, kad jis yra $5{,}4 \times 10^{13}$ Bq. Kokia branduolių dalis skyla?

c) Nieko daugiau neskaičiuodami raskite švino-212 skilimo konstantą.

d) Kokia švino-212 pusėjimo trukmė?

e) Plutonio-239 pusėjimo trukmė, pateikiama žinynuose, yra 24 360 metų. Ši vertė gali būti išmatuota arba pasinaudojant ką tik aptartu metodu, arba metodu, aprašytu 17 klausime. Paaiškinkite, kuris būdas geriau tinka tokiam matavimui.

20 Uranas-238 yra nukleidas, kuriuo prasideda skilimų grandinė, sukurianti po kiekvieno akto vis naują izotopą. Pirmieji devyni skilimo aktai yra: alfa, beta, beta, alfa, alfa, alfa, alfa, alfa, beta. Nupieškite diagramą, panašią į pateiktą 18.32 pav. ir sužymėkite pirmuosius devynis urano-238 skilimo serijos dukterinius produktus.

21 Tarkime, radioaktyviosios spinduliuotės registravimo sistema yra patikima, jei skilimo sparta yra ne mažesnė kaip 0,1 per sekundę. Ji naudojama įvertinti archeologinių medžio bandinių amžių, registruojant anglies-14, kurios pusėjimo trukmė lygi 5730 metų, beta spinduliuotę.

a) 1 kg masės ką tik nupjauto medžio bandinys sukuria 250 1/s skilimo spartą, sąlygojamą sugertos iš oro radioaktyviosios anglies. Kokia bus 1 kg bandinio, kurio amžius 11 000 metų, skilimo sparta?

b) Kokios mažiausios masės turi būti bandinys, kad būtų galima patikimai teigti, jog jo amžius yra apie 11 000 metų?

c) Nustatykite anglies-14 skilimo konstantą.

d) Kiek anglies-14 atomų reikia, kad skilimo sparta būtų 250 1/s?

e) Kokia anglies-14 masė atitinka šią spartą?

f) Dabar įvertinkite anglies-12 ir anglies-14 santykį atmosferoje.

22 Kaip manote, kokios svarbiausios radioaktyvaus šaltinio skleidžiamų trijų jonizuojančiosios spinduliuotės rūšių savybės yra esminės a) ją registruojant, b) jai veikiant gyvąją medžiagą?

Užduotis

RADIOAKTYVIOJO SKILIMO MODELIAVIMAS

Skylant radioaktyviajam nukleidui per apibrėžtą laiko tarpą tam tikra jo branduolių dalis pavirsta kito elemento branduoliais. Pavyzdžiui, uranas-238 skyla į torį-234, spinduliuodamas alfa daleles.

Jei pradedame su A urano-238 branduolių, tai per kokį nors trumpą laiką Δt suskils jų dalis a.

Nuo šiol šioje užduotyje ir skaičiavimų lentelėje, 18.U1 pav., naudosime kiek patogesnius simbolius: (*) reikš daugybą, D atitiks Δ.

Taigi branduolių, suskilusių per trumpą laiko intervalą D*t*, skaičius bus lygus:

DA = –a*A*D*t*

Minuso ženklas čia primena, kad skylant branduoliams jų skaičius mažėja.

Per sekantį tokį pat laiko intervalą Dt suskylančių branduolių dalis vėl bus a, bet jų skaičius bus *mažesnis*, nes naujas skilimas prasideda su mažesniu nesuskilusių urano-238 branduolių skaičiumi.

Skaičiavimų lentele (18.U1 pav.), galima pasinaudoti skaičiuojant branduolių, skylančių per kiekvieną nedidelį laiko intervalą Dt, skaičių, o po to apibendrinus gautus rezultatus, apžvelgti ir skilimo eigą per gana ilgus laiko tarpus. Lentelėje pateiktos visos reikalingos skaičiavimams formulės.

1 Įkelkite į kompiuterį šią lentelę, praplėsdami ją iki 314 eilučių, įveskite formules, langelyje 14B užduokite pradinę A vertę, lygią 100 000. Skilimo konstanta a pasirenkama lygi 0,01. Pasirinkite režimą, kad stulpelyje B būtų pateikiamas nesuskilusių branduolių skaičius kiekvieno atskaitos intervalo pradžioje, o stulpelyje C – atitinkamas DA, tai yra suskilusių per tą laiko intervalą branduolių skaičius. Abiejuose stulpeliuose parinkite režimą, kuriuo būtų atmetamos trupmeninės abiejų skaičių dalys sekose.

2 Pasinaudokite grafikų braižymo paprograme ir pateikite A priklausomybės nuo *t* grafiką. D*t* užduodamas sekundėmis. Naudodamiesi gautu grafiku pabandykite padaryti du ar tris nukleido A pusėjimo trukmės įvertinimus.

3 Pusėjimo trukmė susijusi su skilimo konstanta sąryšiu

$$t_{\frac{1}{2}} = \ln 2/a = 0{,}693/a$$

Įsitikinkite, kad jūsų pusėjimo trukmės įvertinimai sutampa su šia reikšme.

18.U1 pav.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	RADIOAKTYVIOJO SKILIMO MODELIAVIMAS							
2								
3	Motininis nukleidas, A				Dukterinis nukleidas, B			
4	Skaičius prasidedant skilimui, A = 100000				Kiekis iš pradžių = 0			
5	Skilimo konstanta a = 0,01				Skilimo konstanta b = 0			
6	Laiko intervalas D*t*(s) = 1							
7								
8		FORMULĖ		DA = –a*A*Dt		branduolių A skaičiaus pokytis per laiko intervalą Dt		
9				A = A + dA		branduolių A skaičius laiko momentu t		
10				DB = –DA – b*B*Dt		branduolių B skaičiaus pokytis per laiko intervalą Dt		
11				B = B + DB		branduolių B skaičius laiko momentu t		
12				t = t + Dt		laiko prieaugis		
13	**Laikas *t***	**A**	**DA**	**DB**	**B**			
14	0	100000	-1000	1000	0			
15	1	99000	-990	990	1000			
16	2	98010	-980	980	1990			
17	3	97030	-970	970	2970			
18	4	96060	-961	961	3940			
19	5	95099	-951	951	4901			
20	6	94148	-941	941	5852			
21	7	93207	-932	932	6793			
22	8	92274	-923	923	7726			
23	9	91352	-914	914	8648			
24	10	90438	-904	904	9562			
25	11	89534	-895	895	10466			

Dukteriniai branduoliai

Nukleidas A skyla, virsdamas „dukteriniu" nukleidu B. Jei B yra stabilus, galime suskaičiuoti jo kitimą, paprasčiausiai sumuodami DA absoliutines vertes, nes nukleido A branduolių kiekio sumažėjimas virsta nukleido B branduolių skaičiaus padidėjimu. Tačiau, ką daryti, jei pats B yra radioaktyvus, ir jo skilimo konstanta lygi b? Atsakymas yra formulė

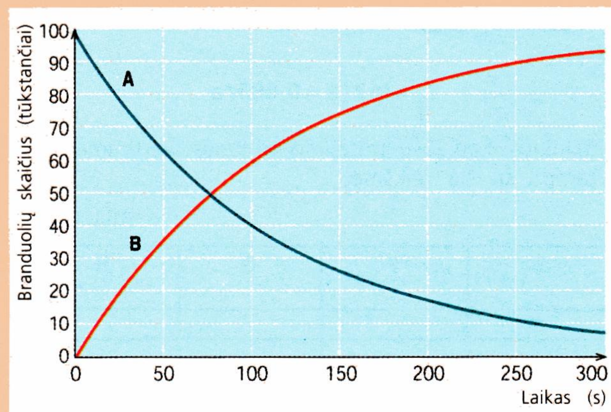
DB = –DA – b*B*D*t*

Ji rodo, kad nors B branduolių skaičius auga dėl A skilimo, jis kartu ir mažėja, kadangi tuo pat metu skyla ir patys B branduoliai.

4

a) Papildykite lentelę duomenimis apie branduolius B. Pradžiai imkite skilimo konstantos b vertę, lygią nuliui. DB ir B reikšmes pateikite stulpeliuose D ir E.

b) Nukleido A branduolių skaičiaus kitimo grafiką papildykite ir nukleido B branduolių skaičiaus priklausomybės nuo t grafiku; turėtumėte gauti kažką panašaus į 18.U2 pav.



18.U2 pav.

5 Dabar patikrinkite, kas būna, kai ir nukleidas B nestabilus. Pradėkite nuo b = 0,005, po to patikrinkite ir kitokias jo vertes. Pakomentuokite, kas atsitinka, kai **(i)** b vertės yra labai mažos ir **(ii)** kai b vertės yra labai didelės palyginti su a verte.

Urano skilimas į šviną

Kalnų amžius gali būti matuojamas pagal urano ir švino branduolių santykį. Urano-238 branduolių skilimas mažai tikėtinas, nes jo pusėjimo trukmė yra labai didelė. Šis branduolys skyla į visą seriją nukleidų, kurių pusėjimo trukmės yra palyginti nedidelės, kol galų gale pavirsta stabiliu švino-206 branduoliu. Šio urano izotopo skilimo į šviną pusėjimo trukmė yra apie 4,5 milijardo metų, arba trumpiau, 4,5 Gm (Gigametų).

6

a) Įsitikinkite, kad atitinkama skilimo konstanta Gm vienetais lygi 0,154.

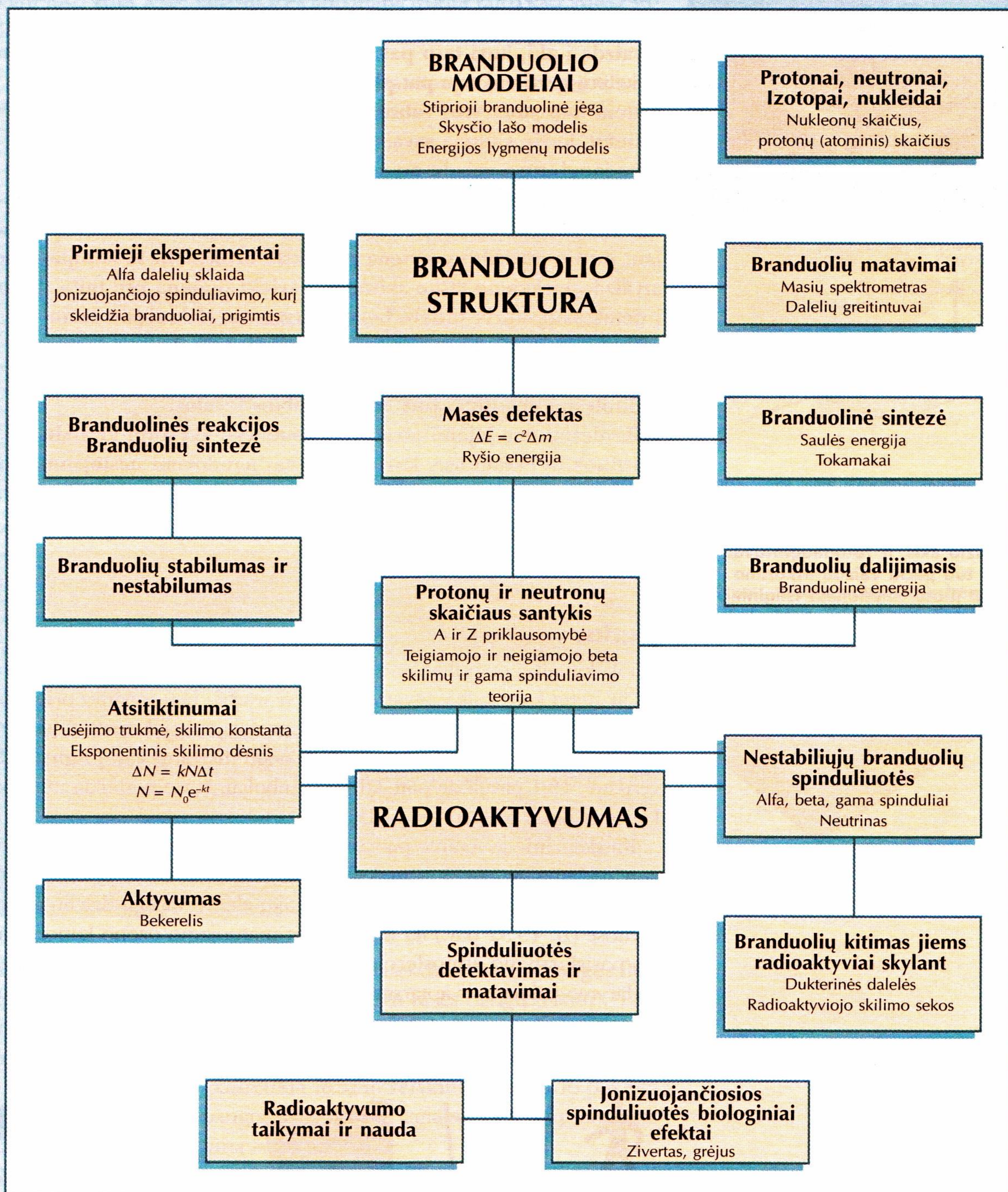
b) Modeliuokite šį skilimą ir pateikite jo grafiką; jums reikės pakeisti laiko ašies mastelį, nes dabar laikas *t* yra matuojamas ne sekundėmis, o Gm.

c) Iš tiesų kalnų medžiagos bandinio amžius matuojamas ne urano ir švino branduolių skaičiaus, o šių elementų masių santykiu. Naudodamiesi urano masės skaičiumi, lygiu 238, ir švino masės skaičiumi 206, pateikite grafiką, kaip šių nukleidų masių santykis kinta bėgant laikui.

d) Tarkime, urano ir švino masių santykis kokiame nors kalnų bandinyje lygus 2,5. Koks šių kalnų amžius? Kodėl šis amžiaus matavimo metodas tinka tik vulkaninės kilmės kalnams?

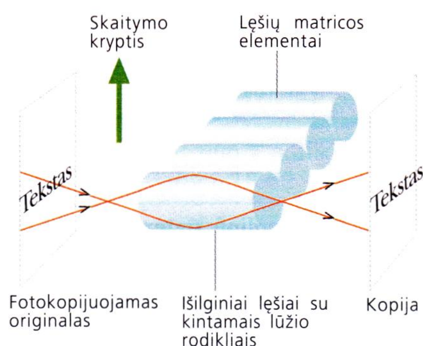
ATOMO BRANDUOLYS

Ši schema pateikia išdėstytas skyriuje pagrindines idėjas apie branduolių prigimtį, jų struktūrą ir tyrimo metodus bei istoriją. Įvairios radioaktyvumo rūšys taip pat padeda geriau pažinti branduolius. Schemoje parodyti šių idėjų ryšiai ir jų tarpusavio priklausomybės. Schema galima naudotis kaip vadovu rasti pagrindinei informacijai, kurią jūs turėjote įsisavinti mokydamiesi šio skyriaus medžiagą. Nagrinėdami šią schemą, galite taip pat patikrinti savo žinias ir išsiaiškinti jūsų dar nepakankamai išnagrinėtus klausimus.



19 Atvaizdų sudarymas





Ir vabzdžio akis, ir fotodaugintuvas pagrįsti tuo pačiu vaizdų atkūrimo principu; juose naudojami išilginiai lęšiai. Kiekvienas lęšis pateikia vaizdo detalę, o visos dalys kartu sudaro bendrą atvaizdą.

Optiniai lęšiai, kurie naudojami, pavyzdžiui, fotoaparatų objektyvuose, teleskopuose ar mikroskopuose, įgalina mus matyti įvairaus dydžio daiktus. Šiuose prietaisuose lęšis (ar keli lęšiai) perduoda atvaizdą į akį, kuri taip pat turi lęšį. Atvaizdas gali būti sudarytas ir keletu gretimai toje pat plokštumoje sudėliotų lęšių sistema. Būtent taip sudarytos vabzdžių akys – jose yra šimtai išilginių lęšiukų, kurie siunčia savąją atvaizdo dalį į smegenis. Fotodaugintuvo vaizdų atkūrimo schema panaši į vabzdžio akį. Šiame prietaise keli milijonai cilindrinių „mikrolęšiukų", kiekvienas vos keleto mikrometrų dydžio, surikiuoti į vieną eilę. Kopijuojant jie vis nuskaito po vieną paveikslo brūkšnelį. Iš kopijuojamo atvaizdo kiekvieno taško sklindanti šviesa praeina pro mikrolęšius į detektorių, kuris sudaro bendrą atvaizdą. Mikrolęšių lūžio rodiklis kinta jų simetrijos ašies atžvilgiu taip, kad sudarytų atvaizdą lygiai taip pat kaip sudaro tikras iškilasis lęšis. Taigi mikrolęšiai nebūtinai turi būti išgaubtos formos.
Mikrolęšiai naudojami atvaizdams sudaryti skystųjų kristalų vaizduoklių ekranuose, kurie paprastai naudojami nešiojamuosiuose kompiuteriuose. Atvaizdo ryškumas tokiuose vaizduokliuose yra daug geresnis nei įprastuose; toks įtaisas, beje, vartoja mažiau energijos.

Įvadas

Šiuolaikiniame pasaulyje atvaizdai tampa tokie pat svarbūs kaip ir raštas ar netgi kaip kalba: atvaizdai tampa svarbia bendravimo priemone. Jais galima perduoti iš karto daug informacijos – juk neretai įsitikiname, kad „geriau vieną kartą pamatyti negu tūkstantį kartų išgirsti". Pavyzdžiui, 19.1 paveiksle pateikti keli simboliai, kurie perteikia mintį kur kas greičiau ir aiškiau nei žodžiai.

Kasdieniame gyvenime patiriame atvaizdų įtaigumą, ypač per televiziją ir reklamą. Šiuolaikinis mokslas neįsivaizduojamas be sudėtingų duomenų vizualizacijos – nuo dalelių pėdsakų elementariųjų dalelių greitintuvuose (žr. 19.52 pav.) iki iš palydovų matuojamo ozono koncentracijos pasiskirstymo atmosferoje. Šiame skyriuje ir aiškinsimės atvaizdų sudarymo principą ir aptarsime svarbiausius atvaizdų kūrimo metodus.





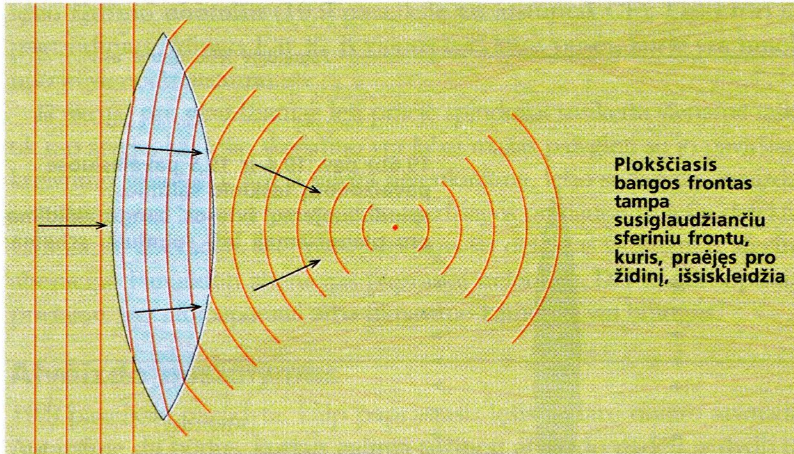



19.1 pav. **Dažnai vartojami simboliai perteikia informaciją kur kas greičiau nei žodžiai**

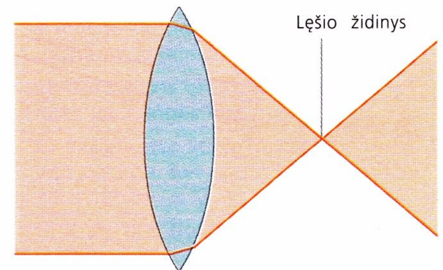
1 KAIP GLAUDŽIAMASIS LĘŠIS SUDARO ATVAIZDĄ

Mes jau susipažinome su iškilaisiais lęšiais. Jų iškiluosius paviršius galime įsivaizduoti kaip dviejų sferų dalis, todėl jie yra vadinami **sferiniais** lęšiais arba tiesiog **paprastaisiais** lęšiais. 19.2–5 paveiksluose pavaizduota, kas atsitinka, kai šviesos bangų frontai praeina pro paprastą stiklinį lęšį. Toks lęšis, kuris pakeičia bangos frontą taip, kad šviesa sutelkiama viename taške – **židinyje**, vadinamas **glaudžiamuoju** lęšiu.

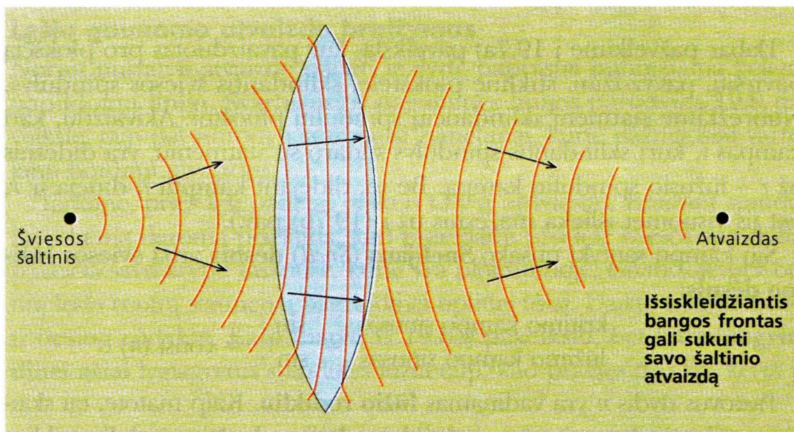
19.2 pav. **Plokščiosios šviesos bangos, sklindančios pro paprastąjį lęšį**



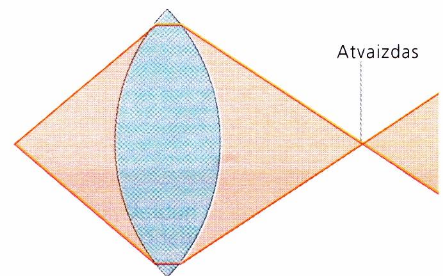
19.3 pav. **Šviesos pluošto schema**



19.4 pav. **Pro paprastąjį lęšį sklindančios išsiskleidžiančios šviesos bangos**



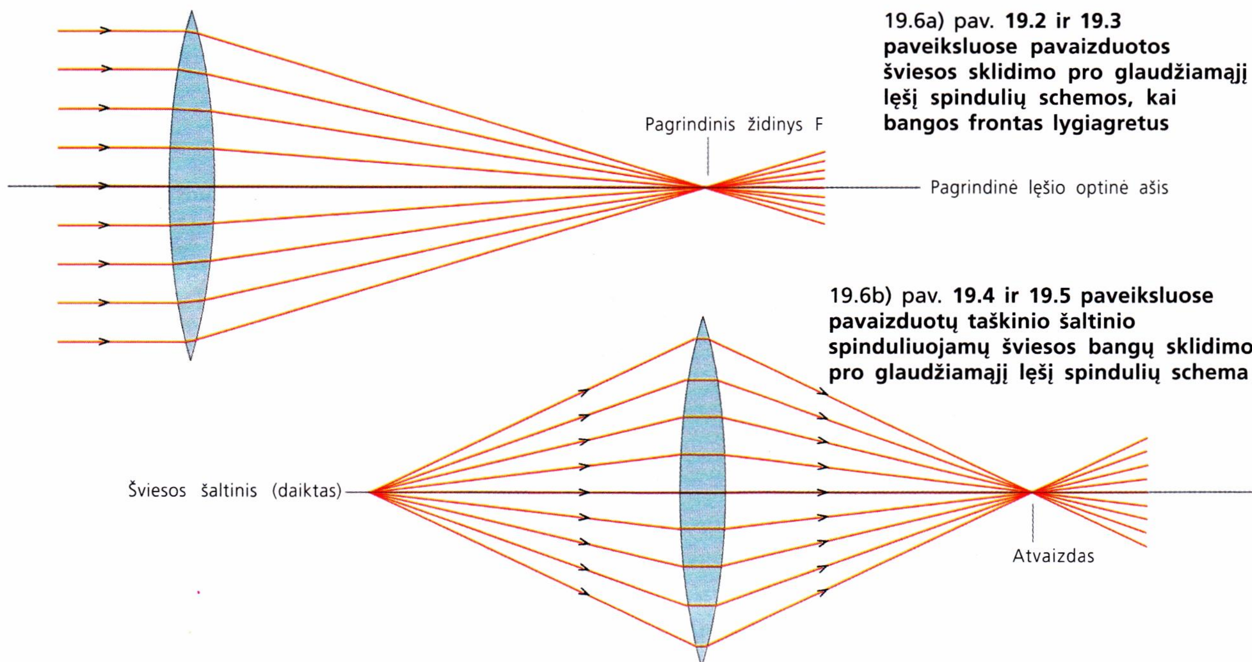
19.5 pav. **Šviesos pluošto schema**



19.2–5 paveiksluose matyti, kad į lęšį patekusios šviesos bangos ilgis sutrumpėja (sumažėja tarpai tarp tos pačios fazės bangų frontų). Taip yra dėl to, kad stikle bangų greitis esti mažesnis negu ore, todėl kiekvieno bangos virpesio metu bangos stiklu nenusklinda taip toli kaip oru. Šis greičio sumažėjimas pasireiškia **lūžimo reiškiniu**, dėl kurio pakinta šviesos kryptis, jeigu tik bangos frontas nėra lygiagretus terpių sandūrai. (Plačiau apie šviesos lūžimą – 12 p.)

19.2–5 paveiksluose pavaizduotas bangų sklidimo schemas gana sudėtinga braižyti. Be to, tokios schemos neatspindi kai kurių šviesos sklidimo ypatumų. Dėl to šiuo atveju patogiau remtis ankstesniuoju, parankesniu šviesos modeliu, kai tariama, kad šviesa sklinda tiesiomis linijomis. Jei toks modelis netiktų (gali būti ir taip!), grįšime prie tobulesnio – bangų – modelio.

19.6a) ir b) paveiksluose nubrėžti tik keli šviesos spinduliai. Spinduliai rodo bangų *kryptį*, t. y. jie atvaizduoti taip, kad sudaro statų kampą su bangų frontu. Kai spindulys pasiekia stiklinį lęšio paviršių, jis lūžta, kaip parodyta paveiksle. Atkreipkite dėmesį, kad 19.6 paveiksle pavaizduotas vidurinis šviesos spindulys sklinda į lęšį stačiu kampu, o kiti spinduliai, didėjant atstumui nuo centro, pasiekia oro ir stiklo sandūrą vis mažesniais kampais. Tai aptarsime šiek tiek vėliau.



19.6a) pav. **19.2 ir 19.3 paveiksluose pavaizduotos šviesos sklidimo pro glaudžiamąjį lęšį spindulių schemos, kai bangos frontas lygiagretus**

19.6b) pav. **19.4 ir 19.5 paveiksluose pavaizduotų taškinio šaltinio spinduliuojamų šviesos bangų sklidimo pro glaudžiamąjį lęšį spindulių schema**

Dabar pažvelkime į 19.7a) paveikslą, kur pavaizduotas pro plokščią paviršių, pavyzdžiui, stiklinę plokštelę, sklindantis šviesos spindulys. Nubrėžkime statmenį sklindančių spindulių pluoštui. Akivaizdu, kad kampas i, kurį sklindantis spindulys sudaro su statmeniu, yra didesnis už r – lūžusio spindulio kampą. Be to, didėjant kampui i, didėja ir r, bet jis visuomet išlieka mažesnis už i (19.7b) pav.).

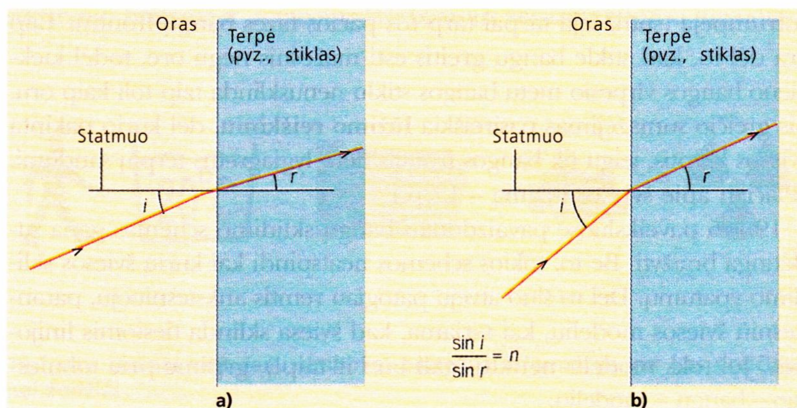
Šių kampų santykį nusako **Snelijaus** (*Snell*) **dėsnis** arba **šviesos lūžimo dėsnis:**

$$\frac{\text{kritimo kampo sinusas}}{\text{lūžimo kampo sinusas}} = \frac{\sin i}{\sin r} = \text{const } (n)$$

Pastovus dydis n yra vadinamas **lūžio rodikliu**. Kaip matote, tai skaičius, rodantis duotosios terpės (stiklo) gebėjimą laužti spindulius, sklindančius iš kitos terpės (oro).

?

A Kaip galima tiksliau nubraižykite šviesos spindulio, sklindančio iš oro į vandenį, kelią. Vandens paviršių spindulys pasiekia 45° kampu. Vandens lūžio rodiklis lygus 1,33.



19.7 pav. **Lūžimo dėsnį iliustruojantys kampai. b) atveju sklindančio spindulio sudaromas su stiklo paviršiumi kampas yra didesnis negu a) atveju**

Dabar atidžiau panagrinėkime, kaip šviesos spinduliai sklinda iš oro į stiklą ir priešingai – iš stiklo į orą glaudžiamajame lęšyje. 19.8 paveiksle pavaizduota padidinta 19.6b) paveikslo dalis. Taškinis šviesos šaltinis įtaisytas tokiu atstumu, kad visi lūžę spinduliai stiklo viduje sklinda lygiagrečiai optinei ašiai. Taigi lūžimo dėsnis galioja ir čia, nes didesniais kampais sklindantys spinduliai lūžta stipriau.

Išgaubtas paprastasis lęšis šviesos spindulius suglaudžia (nors ir ne visai tiksliai) į vieną tašką, vadinamą **židiniu**. Kai pro lęšį praeina plokščia banga, kurios frontas statmenas pagrindinei lęšio optinei ašiai (19.6a) pav.), jos lygiagrečių spindulių susikirtimo vieta vadinama **pagrindiniu židiniu**. Nuotolis nuo šio taško iki lęšio centro yra vadinamas lęšio **židinio nuotoliu** (19.9 paveiksle tai atstumas CF). Lęšis turi *du* pagrindinius židinius F ir F` iš vienos ir iš kitos pusės, kurie yra nutolę nuo jo vienodu atstumu.

Iš tikrųjų pro glaudžiamąjį lęšį praėję spinduliai susikerta viename taške tik tuo atveju, kai lęšio skersmuo yra labai mažas palyginti su jo paviršiaus kreivumo spinduliu. Kai ši sąlyga netenkinama, lęšio sudarytas atvaizdas esti iškraipytas. Šis nuo formos arba medžiagos priklausantis lęšių defektas vadinamas **aberacija**. Sferiniams lęšiams šis defektas vadinamas **sferine aberacija**. Panaikinti aberacijas paprastai nelengva. Dėl to geri optiniai prietaisai, pvz., fotoaparatai arba filmavimo kameros, yra brangūs.

19.8 pav. **Šviesos lūžimas paprastame glaudžiamajame lęšyje**

?

B Šviesa, sklindanti $5{,}0 \times 10^{14}$ Hz dažniu, pasiekia stiklo paviršių.

a) Ore šviesos greitis $3{,}0 \times 10^8$ m · s^{-1}. Koks jos bangos ilgis?

b) Pasiekusios stiklą šviesos bangos ilgis nekinta, bet greitis sumažėja iki $2{,}0 \times 10^8$ m · s^{-1}.

(i) Koks bus šios šviesos bangos ilgis stikle?

(ii) Koks stiklo lūžio rodiklis?

Atvaizdo nustatymas

19.9 paveiksle parodyta, kaip paprastasis lęšis sudaro daikto atvaizdą. Aptarsime du būdus, kuriais galima sužinoti atvaizdo padėtį ir dydį: tai atvaizdo *braižymas* ir skaičiavimas pagal *plonojo lęšio formulę*.

Lęšiu gaunamo atvaizdo braižymas

Norint nustatyti atvaizdo padėtį ir dydį, paprastai nubrėžiama keletas papildomų linijų. Svarbiausios pagalbinės linijos parodytos 19.9 paveiksle, taip pat nurodyti svarbiausi žymėjimai, kurie dažniausiai vartojami braižant atvaizdus.

Tarkime, prieš lęšį padėtas daiktas OX ir apšviestas. Braižant spindulių schemą daroma prielaida, kad praeidami pro lęšį šviesos spinduliai pakeičia savo kryptį taškuose, kurie yra plokštumoje, einančioje per optinį lęšio centrą statmenai pagrindinei optinei ašiai. Daiktą sutarta žymėti tiesiog rodykle. Kaip matyti iš 19.6a) paveikslo, bet kuris **pagrindinei ašiai** lygiagretus spindulys lūžta taip, kad praėjęs pro lęšį kerta jo

■ Žr. 8 (a ir b) klausimą.

19.9 pav. **Glaudžiamuoju lęšiu gauto atvaizdo braižymas. Schemoje pateikti pagrindiniai žymenys bei sąvokos ir parodyti pagalbiniai spinduliai, kuriais naudojantis sudaromas atvaizdas**

pagrindinį židinį F. Taip galime nustatyti spindulio, 19.9 paveiksle pažymėto 1, kryptį.

Taip pat sklinda ir spindulys 2: iš kito pagrindinio židinio F` sklindantys spinduliai praėję lęšį turi būti lygiagretūs pagrindinei optinei ašiai (t.y. tiesiog apgręžiame brėžinį – židiniai F ir F` turi sutapti).

Trečioji reikalinga linija yra 3 spindulys, kuris eina tiesiog per lęšio optinį centrą – jo kryptis nepakinta. Tačiau žvilgtelėkime į centrinę lęšio sritį iš arčiau (19.9 pav. padidinta dalis). Abu mažai išgaubto lęšio paviršiai ties centru beveik lygiagretūs, ir jei lęšis yra toli nuo stebimo daikto, tai šis nedidelis spindulio nuokrypis neturi įtakos atvaizdo kokybei. Visi trys spinduliai prasideda taške X, o susikerta viename taške Y. Vadinasi, taške Y pastačius ekraną, visi trys spinduliai sueis į vieną tašką. Sakoma, kad *Y yra sufokusuotas taško X atvaizdas*. Nesunku suprasti, jog bet kurio atkarpos OX taško sufokusuotas atvaizdas bus tarp I ir Y.

Braižant šiuos tris atvaizdą ribojančius spindulius tinkamu masteliu galima gauti bet kokio daikto, esančio prieš lęšį, atvaizdą. Tokiame brėžinyje galima nustatyti atvaizdo padėtį ir santykinį dydį. Pro lęšius ir jų sistemas stebimi objektai paprastai esti daug mažesni už atstumą tarp jų ir lęšių. Todėl brėžinyje vertikalusis mastelis dažnai parenkamas stambesnis už horizontalųjį.

C Pasitikrinkite, ar gerai supratote 19.9 paveikslą ir atvaizdų braižymo taisykles. Įrodykite, kad 5 cm aukščio daikto, esančio 10 cm atstumu nuo lęšio, kurio židinio nuotolis 6 cm, atvaizdas yra apverstas, 15 cm atstumu nuo lęšio. Atvaizdo aukštis turi būti 7,5 cm. Braižydami ant A4 dydžio lapo galite naudoti vienodą 1:1 mastelį ir vertikaliems, ir horizontaliems atstumams žymėti.

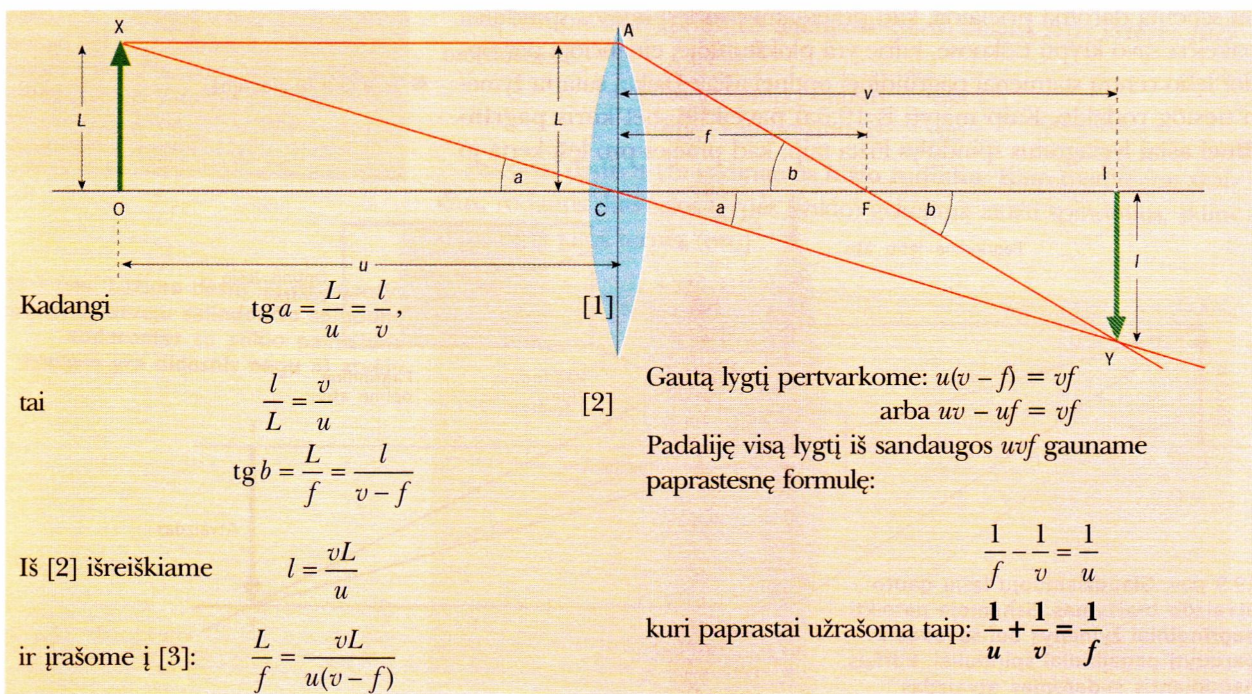
Atvaizdo padėties ir jo dydžio skaičiavimas

Atvaizdo padėtį ir jo dydį galima sparčiau ir tiksliau nustatyti naudojantis **plonojo lęšio formule**:

$$\frac{1}{u}+\frac{1}{v}=\frac{1}{f}$$

kur u yra atstumas tarp daikto ir lęšio centro, t. y. *daikto nuotolis*, v yra atstumas tarp atvaizdo ir lęšio centro – *atvaizdo nuotolis*, f yra lęšio *židinio nuotolis*. 19.10 pav. brėžinyje pateikti visi plono glaudžiamojo lęšio dydžiai, įeinantys į šią formulę. Bet kokio atvaizdo padėtį ir dydį galima rasti tiesiog įrašius žinomus dydžius į formulę.

D Naudodamiesi lęšio formule patikrinkite **C** klausime pateiktas atvaizdo nuotolio ir jo dydžio skaitines vertes.



Kadangi $\operatorname{tg} a=\frac{L}{u}=\frac{l}{v}$, [1]

tai $\frac{l}{L}=\frac{v}{u}$ [2]

$\operatorname{tg} b=\frac{L}{f}=\frac{l}{v-f}$

Iš [2] išreiškiame $l=\frac{vL}{u}$

ir įrašome į [3]: $\frac{L}{f}=\frac{vL}{u(v-f)}$

Gautą lygtį pertvarkome: $u(v-f)=vf$

arba $uv-uf=vf$

Padalįję visą lygtį iš sandaugos uvf gauname paprastesnę formulę:

$$\frac{1}{f}-\frac{1}{v}=\frac{1}{u}$$

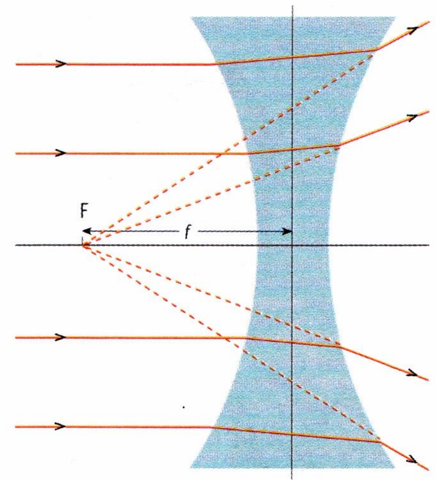
kuri paprastai užrašoma taip: $\frac{1}{u}+\frac{1}{v}=\frac{1}{f}$

19.10 pav. **Plonojo lęšio formulės įrodymas**

2 SKLAIDOMASIS LĘŠIS

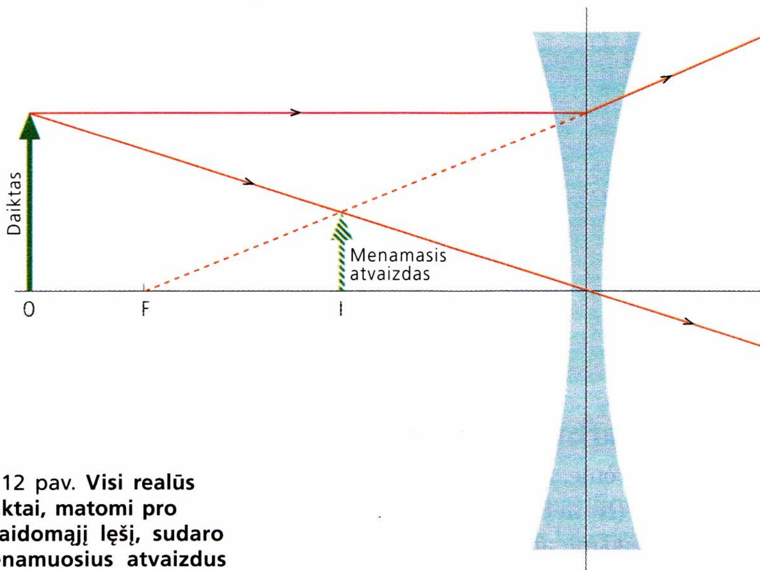
19.11 paveiksle pavaizduota, kas vyksta, kai lygiagretūs šviesos spinduliai (jie atitinka iš tolimo šaltinio sklindančias plokščiafrontes bangas) praeina pro lęšį su įgaubtais sferiniais paviršiais. Brėžinyje matyti, kad spinduliai lūžta taip, tarsi jie sklistų iš vieno taško F. Šis taškas vadinamas sklaidomojo lęšio **pagrindiniu židiniu**. Kadangi šviesa iš tikrųjų iš to taško nesklinda ir jo nekerta, tai šis židinys yra menamasis.

19.12 paveiksle parodyta, kaip sklaidomasis lęšis sudaro daikto atvaizdą. Kaip ir glaudžiamojo lęšio atveju, žiūrėdami pro lęšį į daiktą, galime matyti jo atvaizdą. Tačiau iš tikrųjų šviesa negrįžta atgal nuo lęšio link atvaizdo (mums tik *atrodo*, kad šviesa sklinda nuo jo), todėl tame taške pastačius ekraną atvaizdo pagauti nepavyktų. Dėl to šis atvaizdas vadinamas **menamuoju**.



F yra menamasis pagrindinis židinys

19.11 pav. **Sklaidomasis lęšis turi menamąjį pagrindinį židinį ir neigiamą židinio nuotolį**



19.12 pav. **Visi realūs daiktai, matomi pro sklaidomąjį lęšį, sudaro menamuosius atvaizdus**

■ Žr. 1 klausimą.

Susitarimas dėl ženklo

Lęšio formulę galima taikyti visiems paprastiems optiniams prietaisams (netgi veidrodžiams; tai bus paaiškinta 90 puslapyje). Tačiau norint šia formule pasinaudoti, būtina žinoti, kada atvaizdai, pagrindiniai židiniai – o kartais net ir daiktai – yra tikrieji, ir kada menamieji. Tais atvejais, kai jie menamieji, sutarta priskirti juos atitinkantiems lęšio (ar veidrodžio) nuotoliams *neigiamas* vertes. Pavyzdžiui, pagrindinis sklaidomojo lęšio židinys yra menamasis, dėl to jo židinio nuotolis rašomas su minuso ženklu.

Tarkime, padėjome realų daiktą 20 cm atstumu nuo sklaidomojo lęšio, kaip parodyta 19.12 paveiksle. Pagrindinis židinys yra 10 cm atstumu nuo lęšio, todėl jo židinio nuotolis lygus –10 cm. Įrašę į lęšio formulę gauname:

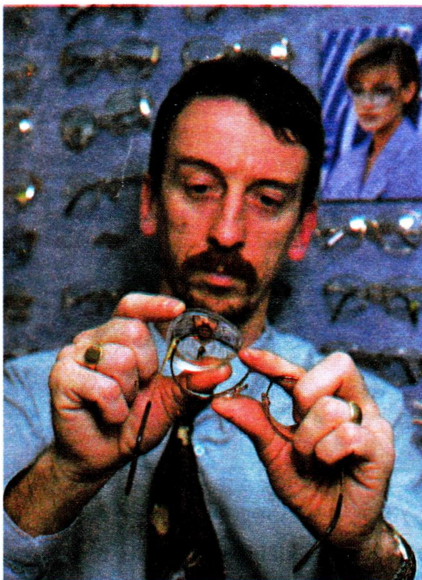
$$\frac{1}{20}+\frac{1}{v}=-\frac{1}{10}$$

Pertvarkome išraišką $\frac{1}{v}=-\frac{1}{10}-\frac{1}{20}=-\frac{3}{20}$

ir apskaičiuojame: $v=-\frac{20}{3}=-6{,}7\,(\text{cm})$

Gavome, kad atvaizdas yra 6,7 cm atstumu nuo lęšio, o minuso ženklas reiškia, kad atvaizdas yra menamasis.

Glaudžiamųjų lęšių židinio nuotoliai teigiami, todėl jie dažnai dar vadinami *teigiamais* lęšiais. Sklaidomieji lęšiai, priešingai, vadinami *neigiamais*.



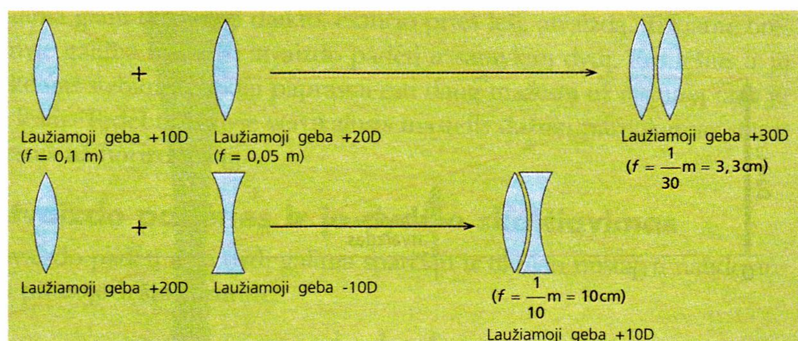
19.13 pav. **Optikas įstato lęšį į akinių rėmus. Ar šis lęšis sklaidomasis ar glaudžiamasis?**

3 LAUŽIAMOJI GEBA

Optikoje lęšių gebėjimas sufokusuoti arba išsklaidyti šviesą paprastai apibūdinamas **laužiamosios gebos** sąvoka. Kuo stipresnis lęšis, tuo arčiau jo sudaromas tolimo daikto atvaizdas. Lęšio laužiamoji geba yra dydis, atvirkščiai proporcingas lęšio židinio nuotoliui, išmatuotam metrais:

$$\text{geba} = \frac{1}{f}$$

Laužiamosios gebos vienetas vadinamas **dioptrija** ir paprastai žymimas simboliu D. Taigi lęšio, kurio židinio nuotolis +10 cm (0,1 m), laužiamoji geba lygi +10 D. Sklaidančiojo lęšio, kurio židinio nuotolis –5 cm (0,05 m), geba –20 D. Dabar pabandykime išsiaiškinti, kaip veikia du kartu sujungti lęšiai. Tokios lęšių sistemos laužiamoji geba yra lygi abiejų lęšių gebų sumai, aišku, atsižvelgiant į jų ženklus (19.14 pav.).

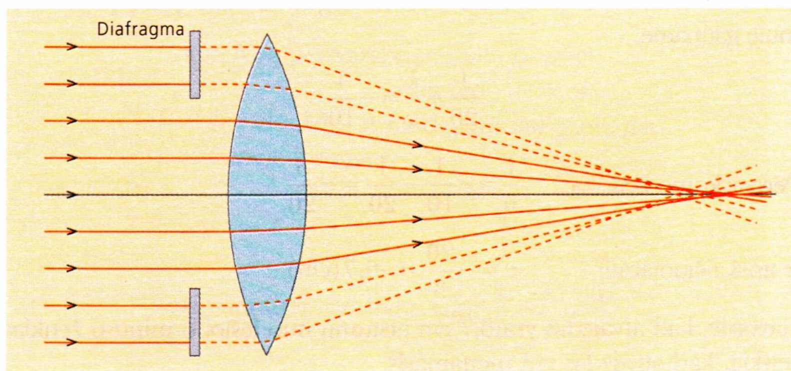


19.14 pav. **Lęšių deriniai: viršuje – du glaudžiamieji; apačioje – glaudžiamasis ir sklaidomasis. Bendra lęšių laužiamoji geba lygi atskirų lęšių gebų sumai**

Lęšis – svarbus fotoaparato „langas"

Mes jau aptarėme, kad lęšiais gaunamų atvaizdų kokybė priklauso nuo lęšio formos (žr. sferinę aberaciją 83 p.). Dar vienas parametras, turintis didelę reikšmę atvaizdo kokybei, yra lęšio **apertūra** – t. y. plotas, kurį kerta į lęšį krintanti šviesa. Suprantama, lęšio skersmuo yra apibrėžtas dydis, tačiau tam tikru įtaisu, vadinamu diafragma, apertūra gali būti keičiama. (Diafragma atlieka ir daugiau funkcijų, pavyzdžiui, fotoaparate ja reguliuojamas patenkančios šviesos srautas.)

Didesnio skersmens lęšis surenka daugiau šviesos ir sukuria šviesesnį atvaizdą negu mažesnio skersmens lęšis. Tačiau yra gana sudėtinga ir brangu koreguoti didelės apertūros lęšių sukeliamas aberacijas. Dėl to nesudėtinguose prietaisuose, pavyzdžiui, paprastuose fotoaparatuose, lęšiai tyčia sumažinami, kad nuotrauka būtų ryškesnė. Atvaizdui sudaryti naudojama tik šviesa, praėjusi pro centrinę lęšio sritį (žr. 19.15 pav.), nes tada sferinė aberacija susilpnėja.



19.15 pav. **Sumažinus lęšio apertūrą nuslopinamos sferinės aberacijos. Tam naudojamos diafragmos, kurios nepraleidžia kraštinių spindulių: šie spinduliai fokusuojami šiek tiek arčiau nei vidiniai spinduliai ir dėl to iškraipomas atvaizdas**

Atvaizdo kokybei turi įtakos ir **difrakcija**. Atvaizdą dengia spalvota aureolė (tai chromatinė aberacija), nes daikto taškai atvaizde „pasipuošia“ difrakciniais žiedais. Dėl to du atvaizdo taškai, kurių matymo kampas mažesnis nei θ, jau nematomi kaip atskiri taškai; o jų **skyra** yra neįmanoma (20 p.). Kampas θ priklauso nuo bangos ilgio λ ir apertūros d; jį galima apskaičiuoti pagal **Reilėjaus** (*Rayleigh*) **dėsnį**:

$$\theta \approx \frac{\lambda}{d}$$

Iš formulės aišku, kad difrakcijos įtaka yra mažesnė, kai apertūra didelė, todėl kuriant tikslius optinius prietaisus tenka rinktis prieštaringą sprendimą: didesnė apertūra reiškia geresnę **skyrą** (16 skyrius), tačiau stipresnę sferinę aberaciją; maža apertūra susilpnina aberaciją, tačiau sumažina skyrą.

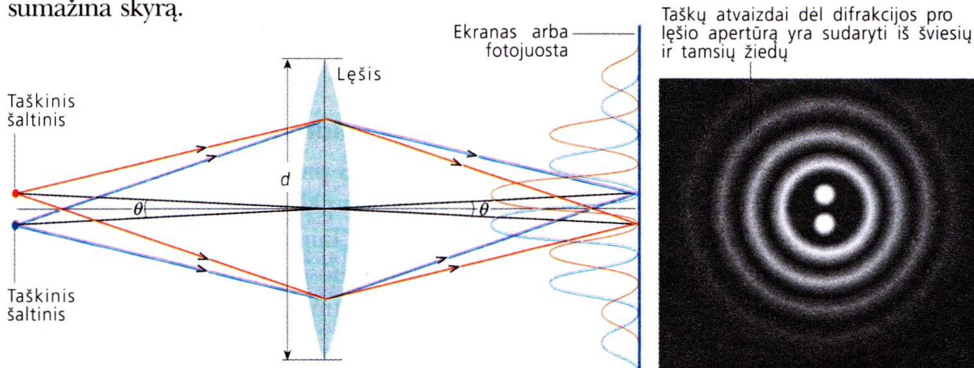
E Fotoaparato lęšių sistemą sudaro dvi dalys: sklaidomasis lęšis, kurio židinio nuotolis 69 mm, ir glaudžiamasis lęšis, kurio židinio nuotolis 29 mm.

a) kokia kiekvieno lęšio laužiamoji geba;

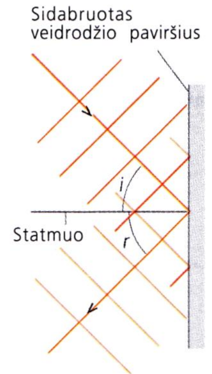
b) kokia tokios lęšių sistemos bendra laužiamoji geba;

c) koks šios sistemos židinio nuotolis?

■ Žr. 8c klausimą.



19.16 pav. **Difrakcija: ribinis dviejų taškinių šviesos šaltinių skyros atvejis – jie matomi atskirai, kai jų atvaizdai lęšio atžvilgiu sudaro kampą θ tokį, kad sin $\theta \approx \theta > \lambda/d$**



19.17 pav. **Plokščiųjų bangų atspindys plokščiame veidrodyje. Kritimo kampas *i* lygus atspindžio kampui *r***

4 VEIDRODŽIAI

Plokštieji veidrodžiai turbūt yra labiausiai paplitę optiniai prietaisai. Įprastas veidrodis yra tiesiog plokščias stiklas, kurio kita pusė padengiama metalinių dažų sluoksniu (dažniausiai naudojamas metalas – aliuminis), o šis padengiamas dar vienu apsauginiu paprastų dažų sluoksniu.

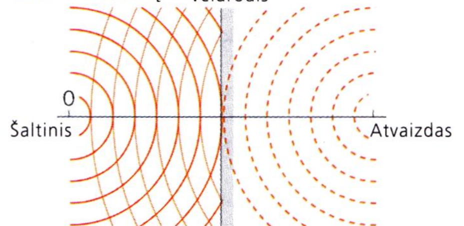
Šviesa praeina pro stiklą ir atsispindi nuo atspindinčio metalinių dažų paviršiaus. Lygus veidrodis plokščių bangų fronto formos nepakeičia – po atspindžio frontas išlieka plokščias.Panagrinėjus tokio šviesos sklidimo grafinį vaizdą, galima suformuluoti gerai žinomą taisyklę:

kritimo kampas lygus atspindžio kampui.

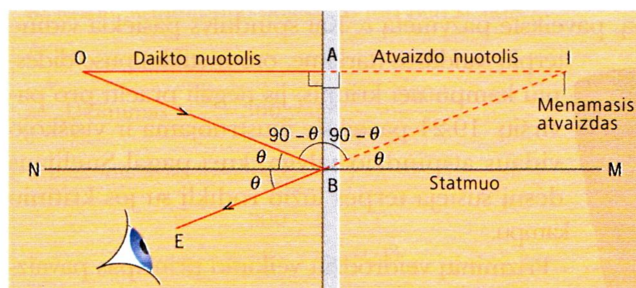
19.17 paveiksle parodyti kritimo ir atspindžio kampai i ir r, sudaromi su **statmeniu** atspindinčiam paviršiui kritimo taške.

Iš 19.18 paveiksle pateiktos bangų schemos nesunku suprasti, kad plokščiojo veidrodžio sudaromas atvaizdas yra tokio pat dydžio kaip ir

■ Žr. 1 klausimą.



19.18 pav. **Iš taško O sklindančios bangos atsispindi plokščiame veidrodyje. Apskritos bangos atspindimos taip, tarsi jos sklistų nuo atvaizdo, esančio tokiu pat atstumu nuo veidrodžio kaip ir taškas O**



19.19 pav. **Naudojantis spindulių sklidimo schema nesunku įrodyti, kad daikto atvaizdas yra nutolęs tokiu pat atstumu nuo veidrodžio kaip ir pats daiktas**

1 būdas. Pagal atspindžio dėsnį:

kampas OAB = IAB = 90°

kampas OBN = EBN (θ)

Pratęsę spindulį EB iki I pagal susikertančių tiesių taisyklę gauname:

kampas OBN = IBM (θ)

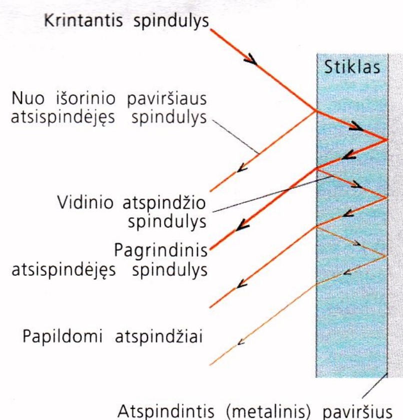
todėl: kampas OBA = IBA (90 – θ)

Kadangi du kampai lygūs, o atkarpa AB bendra, tai trikampiai OAB ir IAB yra lygūs.

Vadinasi, OA = IA

2 būdas. $\operatorname{tg}(90 - \theta) = \dfrac{OA}{AB} = \dfrac{IA}{AB}$

todėl: OA = IA.



19.20 pav. Įprastiniai sidabru padengti veidrodžiai dėl pasikartojančių vidinių atspindžių sudaro šiek tiek iškraipytus atvaizdus

daiktas, be to, atvaizdas yra už veidrodžio tokiu pat atstumu, kaip ir daiktas prieš veidrodį. 19.19 paveiksle pateiktas tikslesnis brėžinys bei įrodymas.

Atkreipkite dėmesį, kad šviesa nepatenka į sritį, esančią už veidrodžio, atvaizdas tėra optinė apgaulė. Atvaizdo iš tikrųjų nėra už veidrodžio – jūs negalėtumėte, tarkim, užfiksuoti jo fotografinėje juostelėje, esančioje atvaizdo vietoje. Todėl toks atvaizdas vadinamas **menamuoju**. Palyginkite šį atvaizdą su 19.6b) paveiksle lęšio sudarytu atvaizdu, kai sklinda tikri šviesos spinduliai, – tokį atvaizdą galima nufotografuoti. Mūsų smegenys suvokia („mato") menamąjį atvaizdą dėl to, kad jį „tikru" paverčia kitas optinis prietaisas – mūsų akys.

19.20 pav. matyti, kad paprastas stiklinis veidrodis atkuria neryškų atvaizdą dėl pasikartojančių atspindžių. Optiniuose prietaisuose, kur būtina gauti kuo ryškesnius atvaizdus, tokie veidrodžiai nenaudojami. Ryškūs atvaizdai gaunami dviem būdais.

Žr. 2 klausimą.

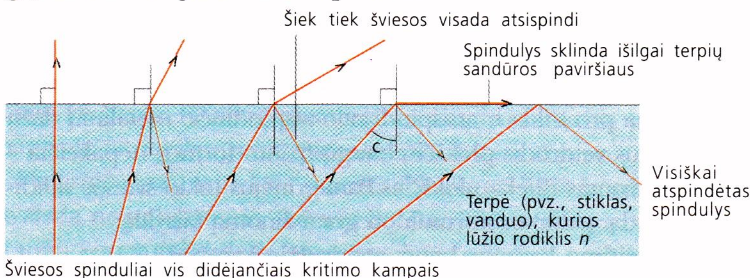
Priekinio atspindinčio paviršiaus veidrodžiai

Tokiuose veidrodžiuose metalo sluoksniu padengiama ne kita pusė, o priekinis veidrodžio paviršius. Labai smulkios išlydyto arba išgarinto metalo dalelės nusėsdinamos ant stiklo. Taip pagaminti dideli veidrodžiai naudojami veidrodiniuose teleskopuose (žr. 95 p.). Metaliniai atspindintys paviršiai pasižymi geromis optinėmis savybėmis, tačiau yra lengvai pažeidžiami, pavyzdžiui, dėl korozijos ar netgi prisilietus, todėl su jais reikia elgtis itin atidžiai.

Žr. 3 klausimą.

Atspindinčios prizmės ir Snelijaus (*Snell*) dėsnis

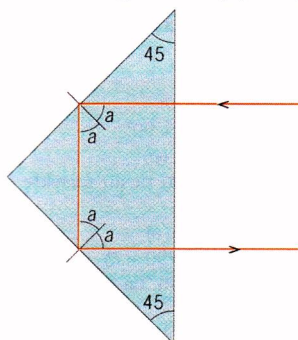
Iš stiklo (ar skaidraus plastiko) pagaminta **atspindinčioji prizmė** yra daug pigesnis ir praktiškesnis plokščiasis veidrodis, kurio veikimas pagrįstas **visiškuoju vidaus atspindžiu**.



19.21 pav. Kaip vyksta visiškasis vidaus atspindys
Visiškasis vidaus atspindys vyksta tada, kai (vidinis) kritimo kampas yra didesnis už ribinį kampą c. Pagal Snelijaus dėsnį:

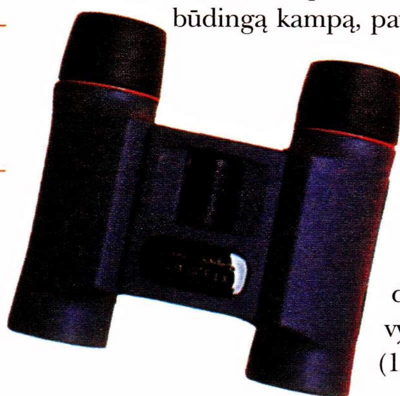
$$\frac{\sin 90}{\sin c} = n \text{ arba } n = \frac{1}{\sin c}$$

19.20 paveiksle pavaizduotoje stiklinėje plokštelėje šviesos spinduliai tik iš dalies atsispindi atgal į terpę, šiuo atveju – į stiklą. 19.21 paveiksle matyti, kad įmanomas ir visiškasis vidaus atspindys, kuris vyksta tik tuomet, kai spindulio kritimo kampas yra didesnis už tam tikrą tai terpei būdingą kampą, paveiksle pažymėtą c. Kai spindulys pasiekia vidinę terpių sandūros (tarkime, oro ir stiklo) pusę didesniu kampu nei kritinis, jis negali praeiti pro paviršių. 19.21 paveiksle iliustruojama ir visiškojo vidaus atspindžio sąlyga, kuri pagal Snelijaus dėsnį susieja terpės lūžio rodiklį su jos kritiniu kampu.



19.22 pav. Atspindinti prizmė – tai prizmė, naudojama kaip veidrodis. Kampas *a* turi būti didesnis už ribinį tai medžiagai būdingą kampą *c*

Prizminių veidrodžių veikimo principas pavaizduotas 19.22 pav. Tokie veidrodžiai naudojami, pavyzdžiui, kai kurių tipų fotoaparatuose ir žiūronuose (19.23 pav.).



19.23 pav. Naudojant prizmes galima sumažinti žiūronų matmenis

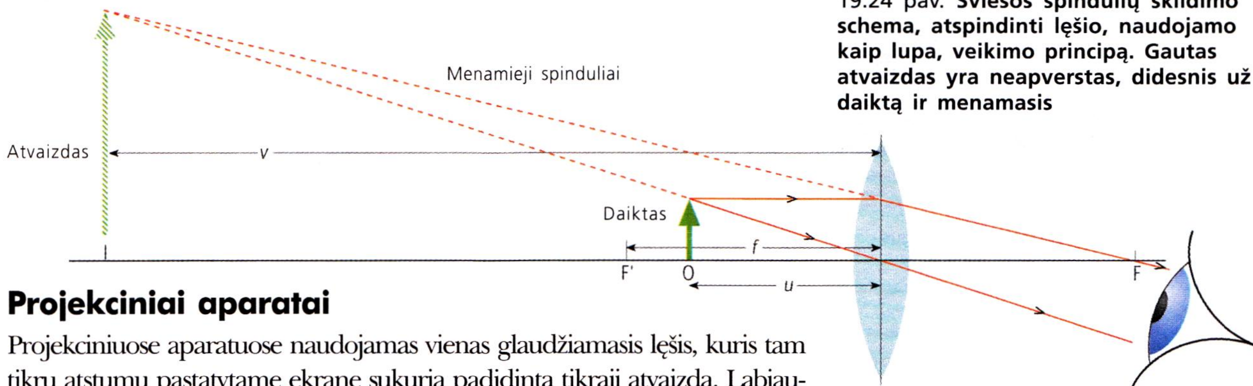
5 OPTINIAI PRIETAISAI: VIENO LĘŠIO PRIETAISAI

Didinamasis stiklas

Glaudžiamasis lęšis gali būti naudojamas kaip **didinamasis stiklas**, dažnai vadinamas **lupa**. Kartais didinamasis stiklas vadinamas **paprastuoju mikroskopu**. Didinamasis stiklas laikomas arti akies, o daiktas turi būti jo židinio plokštumoje ar šiek tiek arčiau. Kaip matyti 19.24 paveiksle, lęšis tada sudaro neapverstą padidintą daikto menamąjį atvaizdą. Teleskopo ar mikroskopo okuliaro lęšis veikia tokiu pat būdu kaip didinamasis stiklas.

?

F Daiktas padėtas 4 cm atstumu nuo glaudžiamojo (iškiliojo) lęšio, kurio židinio nuotolis 6 cm. Skaičiavimais arba remdamiesi brėžiniu įrodykite, kad lęšio sudarytas atvaizdas yra menamasis, nutolęs12 cm atstumu nuo lęšio ir yra 3 kartus didesnis už daiktą.



19.24 pav. **Šviesos spindulių sklidimo schema, atspindinti lęšio, naudojamo kaip lupa, veikimo principą. Gautas atvaizdas yra neapverstas, didesnis už daiktą ir menamasis**

Projekciniai aparatai

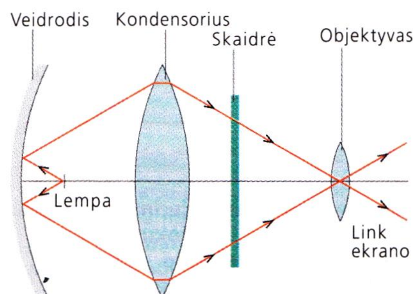
Projekciniuose aparatuose naudojamas vienas glaudžiamasis lęšis, kuris tam tikru atstumu pastatytame ekrane sukuria padidintą tikrąjį atvaizdą. Labiausiai paplitę tokios rūšies optiniai prietaisai yra kino, skaidrių ir skaidruolių projektoriai. Konstruojant bet kokį projektorių svarbiausia yra turėti gana stiprų šviesos šaltinį – kad jo apšviestas mažas paveikslėlis ekrane susiprojektuotų į pakankamai šviesų ir ryškų padidintą atvaizdą. Labai dažnai tam naudojamos aukštatemperatūrės kaitinimo lempos. Jų skleidžiama labai stipri infraraudonoji spinduliuotė gali įkaitinti ir pažeisti skaidrę ar juostelę.

■ Žr. 4 ir 5 klausimus.

Skaidrių projektorius

19.25 paveiksle pateikta tipinė skaidrių projektoriaus schema.

Pirmasis lęšis (kondensuojantysis lęšis – **kondensorius**) surenka kaip galima daugiau šviesos, kuri apšviečia skaidrę. Specialus stiklinis filtras sugeria infraraudonuosius spindulius. Šis filtras bei ventiliatorius neleidžia skaidrei įkaisti. Skaidrė įtaisoma labai arti pagrindinio projektoriaus lęšio – **objektyvo** – židinio, todėl atvaizdo nuotolis, taip pat ir atvaizdo dydis, gaunamas labai didelis.



19.25 pav. **Skaidrių projektoriaus įrengimas**

PAVYZDŽIAI

K Ekrane turi būti matomas 300 kartų didesnis skaidrės atvaizdas. Projektoriaus objektyvo židinio nuotolis 3,00 cm.

a) Kokiu atstumu nuo objektyvo turi būti pastatytas ekranas?

b) Kokiu atstumu nuo objektyvo turi būti skaidrė?

A

a) Didinimas $= \frac{v}{u} = 300$, taigi $\frac{1}{u} = \frac{300}{v}$

Pritaikome lęšio formulę:

$$\frac{300}{v} + \frac{1}{v} = \frac{1}{0{,}03}$$

Suprastinę šį reiškinį gauname $v = 0{,}03 \times 301 = 9{,}03$ m $= 903$ cm. Vadinasi, ekranas turi būti pastatytas 903 cm atstumu nuo projektoriaus objektyvo.

b) Žinodami didinimo koeficientą, nesunkiai randame daikto nuotolį:

$$u = \frac{v}{300} = \frac{903}{300} = 3{,}01 \text{ cm}$$

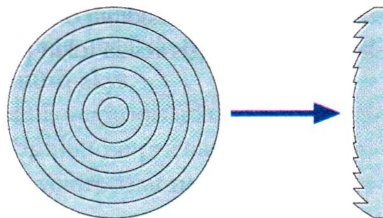
Skaidrė turi būti vos vienos dešimtosios milimetro atstumu už pagrindinio objektyvo židinio.

Pastaba: Skaidrė paprastai įdedama į neslankų laikiklį, todėl atvaizdo ryškumas nustatomas keičiant objektyvo padėtį. Norint tiksliai objektyvu fokusuoti, jis įtvirtinamas specialiame sukiojamame laikiklyje su labai mažu sriegio žingsniu.



Skaidruolių projektorius

Labiausiai paplitusi projekcinė sistema, su kuria jūs veikiausiai susidursite, yra **skaidruolių projektorius**. Jis veikia panašiai kaip ir skaidrių projektorius, tik čia dar naudojamas papildomas veidrodis. Dėl to projektuojamas objektas gali būti horizontalioje padėtyje. Skaidruolė yra daug didesnė už skaidrę, todėl kondensoriaus lęšis turi būti labai didelis, vadinasi, sunkus ir brangus. Tokiame projektoriuje kondensoriaus funkciją paprastai atlieka **Frenelio lęšis**, pavaizduotas 19.26 paveiksle.

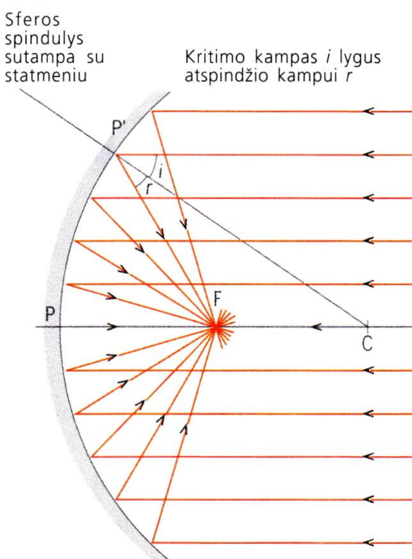


19.26 pav. **Frenelio lęšiais (kairėje) naudojasi silpnaregiai, nes tokie lęšiai gali padidinti, pavyzdžiui, didelį atspausdinto teksto plotą. Naudojami kaip kondensoriai skaidruolių projektoriuose, Frenelio lęšiai (dešinėje) užima mažiau vietos, jie yra lengvi ir palyginti nebrangūs**

Sferiniai veidrodžiai

Įgaubtieji veidrodžiai

Sferiniai veidrodžiai atvaizdus sudaro labai panašiai kaip ir stikliniai lęšiai. **Įgaubtasis veidrodis** fokusuoja lygiagrečius spindulius taip, kaip pavaizduota 19.27 paveiksle: į vieną tašką – pagrindinį židinį F. Norint rasti priešais veidrodį pastatyto daikto atvaizdą, galima, kaip ir lęšiams, braižyti pagalbinius spindulius (19.28 pav.).

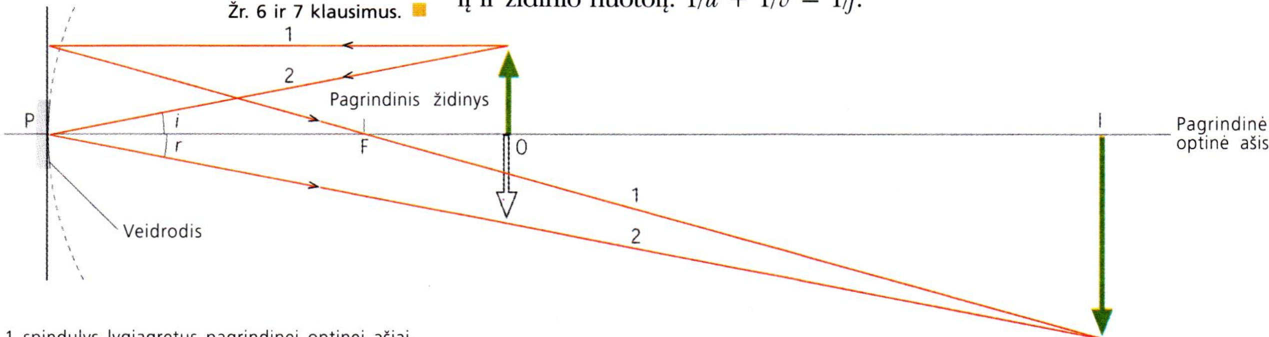


19.27 pav. **Įgaubtasis sferinis veidrodis. Lygiagretūs spinduliai fokusuojami taške F. PF = *f*, kreivumo spindulys PC = 2*f*. (Sferinė aberacija šiame paveiksle nepavaizduota)**

Žr. 6 ir 7 klausimus.

Pagrindiniai įgaubtojo veidrodžio elementai pavaizduoti 19.27 paveiksle. Taškas P vadinamas sferinio veidrodžio **poliumi**. Taškas C yra sferos, kurios dalį sudaro veidrodis, **kreivumo centras**, o PC – atstumas tarp kreivumo centro ir poliaus – yra **kreivumo spindulys**. Akivaizdu, kad pagrindinis židinys yra pagrindinėje optinėje veidrodžio ašyje (tiesė PC) tarp veidrodžio kreivumo centro ir poliaus (vienodai nuo abiejų nutolęs), todėl lęšio židinio nuotolis yra PC/2. Taip apibrėžti židinio nuotolį tinka tik veidrodžiams, kurių kampas tarp veidrodžio kraštų ir sferos centro yra labai mažas arba, kitais žodžiais tariant, veidrodžio skersmuo yra daug mažesnis už jo kreivumo spindulį. Jei taip nėra, tai atvaizdas iškraipomas, panašiai, kaip pavaizduota 19.15 paveiksle. Šis reiškinys vadinamas *sferinė aberacija*.

Veidrodžio sudaryto atvaizdo dydį ir padėtį galima rasti naudojant tą pačią plonojo lęšio formulę, susiejančią daikto nuotolį, atvaizdo nuotolį ir židinio nuotolį: $1/u + 1/v = 1/f$.



1 spindulys lygiagretus pagrindinei optinei ašiai, todėl atsispindėjęs spindulys kerta pagrindinį židinį F

2 spindulio kritimo kampas *i* lygus atspindžio kampui *r*

Atvaizdas yra tikrasis, apverstas ir didesnis už daiktą

19.28 pav. **Atvaizdas, sudarytas įgaubtuoju veidrodžiu, nustatomas brėžinyje pagalbiniais spinduliais**

Įgaubtąjį veidrodį galima palyginti su glaudžiamuoju lęšiu, juo galima gauti tikruosius ir menamuosius atvaizdus. Įgaubtieji veidrodžiai kaip didinantys prietaisai naudojami buityje, pavyzdžiui, padidinti veido atvaizdui. Panašiai kaip ir naudojant didinamąjį stiklą (žr. 89 p.), daiktas turi būti šiek tiek arčiau veidrodžio nei jo pagrindinis židinys. Įgaubtieji veidrodžiai naudojami kaip *objektyvai* dideliuose astronominiuose teleskopuose (žr. 95 p.).

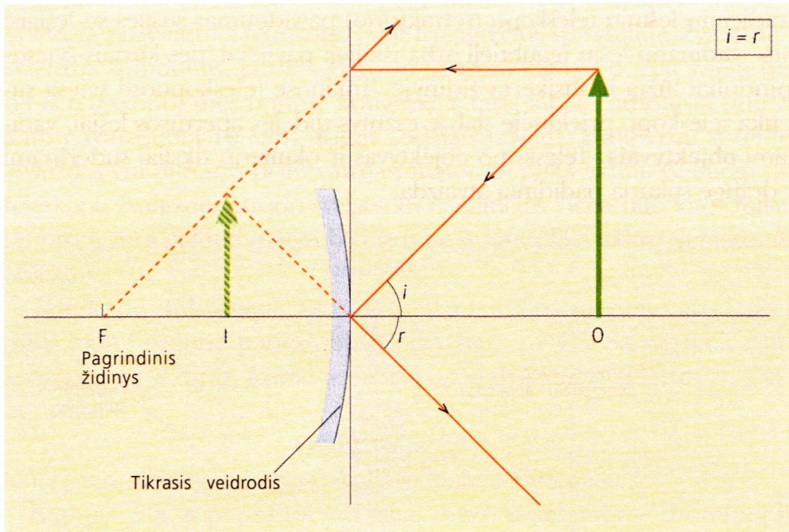
Iškilieji veidrodžiai

Iškilieji veidrodžiai veikia panašiai kaip įgaubtieji (sklaidomieji) lęšiai. Jų židinio nuotoliai yra neigiami ir jie kuria menamuosius realių daiktų atvaizdus (19.29 pav.) Kadangi tokie veidrodžiai padidina regėjimo kampą, tai jie naudojami automobilių galinio vaizdo veidrodžiuose, blogai matomuose išėjimuose ir įėjimuose ar prekybos salėse.

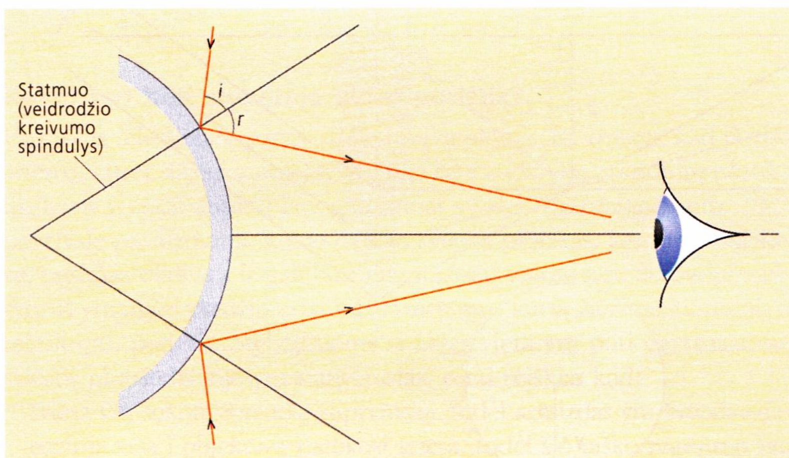
G Raskite 1,4 m ūgio vaiko, stovinčio 2 m atstumu nuo iškilojo (sklaidomojo) veidrodžio, kurio židinio nuotolis 4 m, atvaizdo padėtį ir dydį. Kur galėtų būti panaudotas toks veidrodis?

H a) Braižydami ant milimetrinio popieriaus nustatykite įgaubtojo veidrodžio kuriamo atvaizdo dydį ir padėtį. Duomenys: veidrodžio kreivumo spindulys 80 cm; daikto nuotolis iki veidrodžio 20 cm; daikto aukštis 4 cm.

b) Naudodamiesi lęšio formule $1/u + 1/v = 1/f$ patikrinkite a) dalyje gautus rezultatus.



19.29 pav. **Iškiluoju veidrodžiu kuriamas atvaizdas. Jis yra neapverstas, menamasis ir didesnis už daiktą**



19.30 pav. **Iškilasis veidrodis praplatina regėjimo lauką. Jis sudaro sumažintą didelės srities atvaizdą**

I Skaičiuodami arba braižydami raskite 24 mm × 32 mm dydžio skaidrės, padėtos 40 mm atstumu nuo įgaubtojo veidrodžio, kurio židinio nuotolis 36 mm, atvaizdo padėtį bei dydį. Koks atvaizdas – tikrasis ar menamasis?



19.31 pav. **Iškilieji veidrodžiai kartais naudojami apsaugai prekybos salėse, keliuose ties staigiais vingiais ir blogai matomais skersgatviais**

6 OPTINIAI PRIETAISAI IŠ DVIEJŲ DALIŲ

Astronominiai teleskopai – refraktoriai

Astronominis teleskopas yra optinis prietaisas, naudojamas labai tolimų objektų padidintiems atvaizdams sudaryti. Tačiau teleskopai konstruojami taip, kad atliktų dar vieną svarbią funkciją – surinktų kaip galima daugiau šviesos, kurią skleidžia tolimi, paprastai labai blausūs objektai. Tradicinių lęšinių teleskopų (refraktorių) pavadinimas susijęs su lęšiais: taip vadinami lęšių įgaubtieji arba iškilieji paviršiai, ties kuriais šviesos spinduliai lūžta ir susikerta židinyje. Tokiuose teleskopuose šviesą surenka teleskopo priekinėje dalyje esantys didelės apertūros lęšiai, vadinami **objektyvais**. Teleskopo objektyvas ir okuliaras tiksliai suderinami ir drauge sukuria padidintą atvaizdą.

19.32 pav. **Teleskopas surenka šviesą, todėl gaunami ryškesni tolimų objektų atvaizdai. Be to, jis išskiria nutolusių objektų šviesą, t.y. didina. Kampai α ir β aiškumo dėlei pavaizduoti didesni nei yra iš tikrųjų**

$$\text{tg}\,\alpha = \alpha = \frac{h}{f_{ok}}$$

$$\text{tg}\,\beta = \beta = \frac{h}{f_{ob}}$$

a) Kampas, kuriuo regimi tolimi objektai plika akimi

b) Kampas, kuriuo regimi tolimi objektai pro teleskopą

19.32 paveiksle pavaizduota, kaip šviesos spindulių pluoštas, sklindantis iš tolimo objekto, praeina pro teleskopą. Kadangi iš tolimo objekto sklindantys spinduliai yra beveik idealiai lygiagretūs (su plokščiu bangos frontu), tai sakoma, kad objektas nutolęs **be galo toli**.

Išnagrinėkime 19.32 schemą. Objektyvas savo pagrindinio židinio F plokštumoje sudaro tikrąjį daikto atvaizdą. Okuliaro padėtis turi būti nustatyta taip, kad jo pagrindinio židinio plokštuma būtų ties tuo pačiu F tašku. Tada iš prietaiso išeinantis pluoštelis bus sudarytas iš lygiagrečių spindulių, kurį bus galima stebėti plika akimi. Gautas atvaizdas yra menamasis, apverstas, o jo nuotolis – lygus begalybei. Taip suderintas teleskopas vadinamas **normaliai suderintu** ir dažniausiai naudojamas tolimų objektų stebėjimui. Tačiau okuliaro padėtis gali būti pakeista taip, kad teleskopas kurtų tikrąjį atvaizdą, kurį galima ir fotografuoti.

Žr. 8b ir 9 klausimus. ■

Didinimas

19.32 paveiksle matyti, kad pro okuliarą praeinantis spindulių pluoštas sudaro didesnį kampą (β) su pagrindine instrumento ašimi (OE) negu į objektyvą krintantys spinduliai (α). 19.32a) ir b) paveiksluose tai išanalizuota. Įsivaizduokime, kad tyrinėjame dviejų žvaigždžių X ir Y sistemą. Be teleskopo, žiūrėdami plika akimi šią sistemą regime labai mažą, kaip pavaizduota 19.32b). Tarkime, žvaigždė X yra atvaizdo centre, ji skleidžia pagrindinei teleskopo ašiai lygiagrečius spindulius. Žvaigždė Y skleidžia spindulius, kurie sudaro su ta ašimi kampą α. Kai šviesa išeina iš teleskopo, mes regime žvaigždę Y tarsi labiau nutolusią nuo X, kaip pavaizduota 19.32b). Kitais žodžiais tariant, žvaigždžių sistemos atvaizdas yra didesnis negu vaizdas, matomas plika akimi. Kadangi pro teleskopą žvaigždės atrodo šviesesnės ir esančios viena nuo kitos toliau, tai pro jį mes galime matyti blausius ar iš viso plika akimi nematomus objektus.

Teleskopo **didinimas** yra tiesiog pro teleskopą regimo atvaizdo ir plika akimi regimo paties objekto dydžių santykis. Šis santykis lygus santykiui tg β /tg α, kuris, jei teleskopas tinkamai suderintas, lygus santykiui

$$\text{OF/FE arba } f_{ob}/f_{ok},$$

kur f_{ob} yra objektyvo, o f_{ok} – okuliaro židinių nuotoliai.

Kampai β ir α paprastai yra labai maži, todėl galime didinimą išreikšti tokiu santykiu:

$$\text{didinimas} = \beta/\alpha = f_{ob}/f_{ok}$$

?

J Astronominio teleskopo objektyvo židinio nuotolis 1,2 m. Koks turi būti okuliaro židinio nuotolis, kad teleskopo didinimas būtų 150?

?

K Tipinio mėgėjiško veidrodinio teleskopo veidrodžio židinio nuotolis 1,2 m. Koks tokio teleskopo didinimas, jei jame naudojamas okuliaras, kurio židinio nuotolis 40 mm? Tarkime, astronomas mėgėjas įsigijo okuliarą, kurio židinio nuotolis 2,4 mm. Ar galite nurodyti kokius nors tokio trumpo židinio nuotolio okuliaro naudojimo trūkumus?

✓

Kampams θ, mažesniems kaip 5°, galioja tokia lygybė: sin $\theta \approx$ tg $\theta \approx \theta$ radianų.

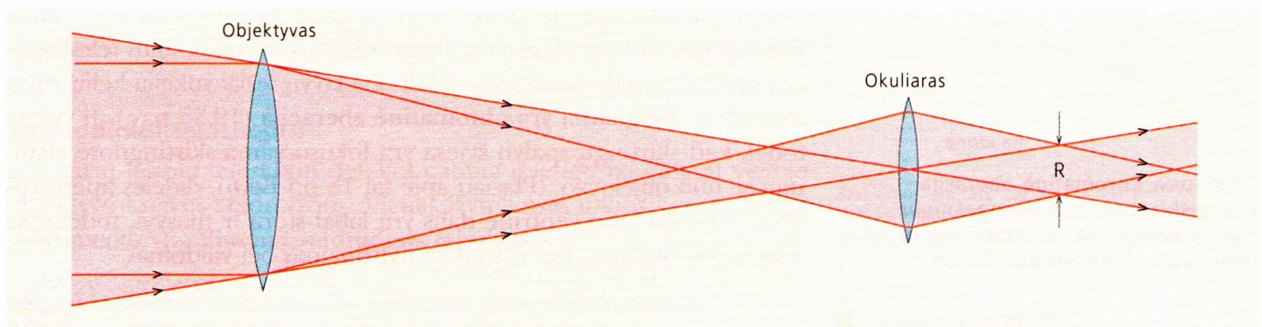
■ Žr. 8c, 10 ir 11 klausimus.

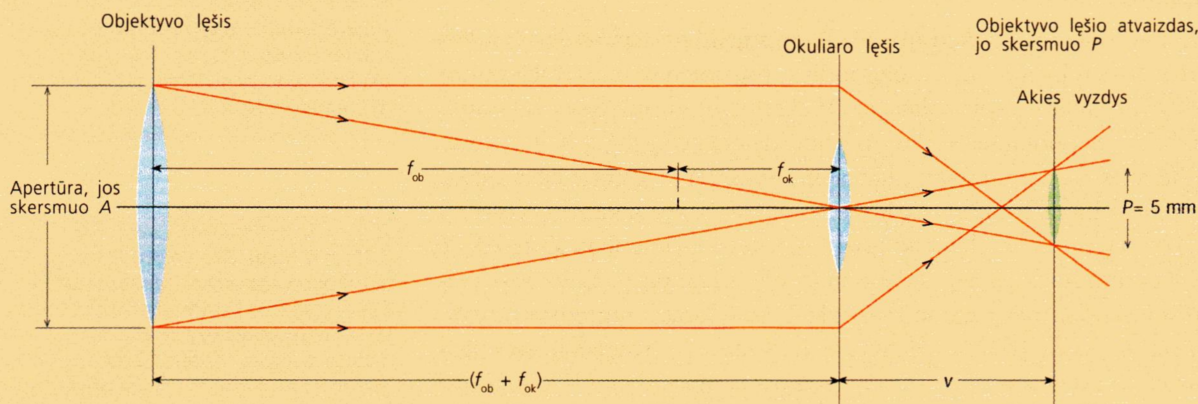
Kokia turi būti stebėtojo akies padėtis?

Paprastas teleskopas skirtas stebėti plika akimi. Tai reiškia, kad iš visos šviesos, kurią surenka objektyvas, turi būti sudarytas spindulių pluoštelis, kuris visiškai atitiktų žmogaus akies vyzdį – maždaug 5 mm. 19.33 paveiksle pavaizduota, kokio dydžio šviesos pluoštas, kertantis objektyvą, pasiekia okuliarą ir gali būti naudojamas galutiniam atvaizdui sudaryti. R yra akies vyzdžio arba kiaurymės, pro kurią žiūrime žiūronais ar teleskopu, padėtis. Stebėjimams ši akies vieta yra pati geriausia, nes šviesos pluoštelis joje yra siauriausias, o tai reiškia, kad:

- šviesa yra sukoncentruota stipriausiai, todėl atvaizdas yra **šviesiausias;**
- regima visa į objektyvą patekusi šviesa, todėl šio taško **regėjimo laukas yra didžiausias.**

19.33 pav. **Vyzdžio padėtis taške R**





Iš didinimo formulės $M = \frac{v}{u}$ gauname $\frac{P}{A} = \frac{v}{f_{ob} + f_{ok}}$

Okuliaro lęšio padėtis tokia, kad $u = f_{ob} + f_{ok}$ ir $f = f_{ok}$.

$$\frac{1}{f_{ob} + f_{ok}} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f_{ok}}$$

$$\frac{1}{v} = \frac{1}{f_{ok}} - \frac{1}{f_{ob} + f_{ok}} = \frac{f_{ob} + f_{ok} - f_{ok}}{f_{ok}(f_{ob} + f_{ok})}$$

Iš gauto reiškinio randame $$v = \frac{f_{ok}(f_{ob} + f_{ok})}{f_{ob}}$$

Įrašę v išraišką randame objektyvo apertūrą:

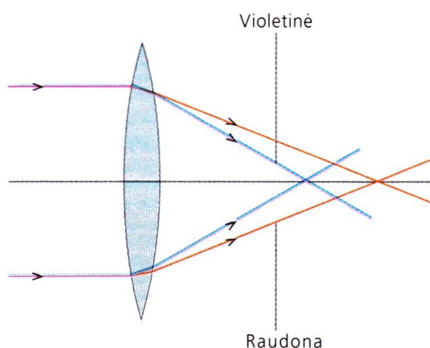
$$A = \text{vyzdžio skersmuo (mm)} \times \frac{f_{ob}}{f_{ok}}$$

arba $$A = 5\frac{f_{ob}}{f_{ok}} \text{ (mm)} = 5M$$

kur M yra teleskopo didinimas, o vyzdžio skersmuo lygus akies vyzdžio skersmeniui, t. y. maždaug 5 mm.

Gautieji rezultatai rodo, kad vyzdžio padėtis yra atstumu v, lygiu L/M, nuo objektyvo, kur L yra atstumas tarp lęšių.

19.34 pav. **Teleskopo didinimo skaičiavimas**



19.35 pav. **Chromatinė aberacija pasireiškia tuo, kad trumpesniųjų bangų šviesa fokusuojama arčiau lęšio negu ilgesniųjų bangos šviesa**

Žr. 10 ir 11 klausimus.

Nesunku įrodyti, kad akies vyzdžio padėtis ir dydis yra tokie patys kaip ir *okuliaro sukurto objektyvo atvaizdo dydis ir padėtis*. 19.34 paveiksle parodyta, kaip šis teiginys susijęs su atstumu tarp lęšių, o tuo pačiu – ir su teleskopo didinimu.

Refraktorių trūkumai

Norint surinkti kuo daugiau šviesos ir gauti didesnį didinimą, reikia naudoti kuo didesnį objektyvą. Tačiau didelius astronominius teleskopus yra sudėtinga pagaminti, nes dideli objektyvų lęšiai sukelia kelių rūšių aberacijas. Blogiausia yra **chromatinė aberacija** (19.35 pav.). Ji vyksta todėl, kad skirtingų spalvų šviesa yra fokusuojama skirtinguose atstumuose nuo objektyvo. (Plačiau apie tai 13 p.) Be to, didelės apertūros glaudžiamojo lęšio centrinė dalis yra labai stora ir masyvi, todėl toks lęšis ne tik brangus, bet ir sunkiai įtvirtinamas bei valdomas.

GALILĖJAUS TELESKOPAS

Pirmojo teleskopo konstruktoriaus vardas bei sukūrimo data liko neužfiksuoti istoriniuose šaltiniuose. Spėjama, kad pirmas šį instrumentą 1604 m. pagamino Olandijoje Johnas Leprėjus pagal itališką modelį, ant kurio buvo užrašyta „Anno 1590". Gal 1590 m. ir buvo sukurtas pirmais teleskopas, tačiau dokumentiškai tai niekur nepatvirtinta.

Manoma, kad teleskopai pradėjo plisti nuo 1608 metų. Tais metais didžiojoje kasmetinėje vasaros mugėje Vokietijoje Frankfurte prie Maino keliaujantis prekeivis siūlė pirkti naują prekę – vamzdelį, kurio viename gale buvo įgaubtasis, o kitame – iškilasis lęšis. Pažiūrėjus pro tą vamzdelį, tolimi daiktai atrodydavo septyniskart didesni. Tačiau spalio mėnesį Olandijoje, kai vienas žiūronų gamintojas paprašė užpatentuoti teisę gaminti ir pardavinėti tokius pačius „teleskopus" (pažodžiui verčiant – „tolumos pranašai", angliškai „far seers"), jo prašymas buvo atmestas, nes paaiškėjo, jog tuo metu daugelis meistrų tokius optinius instrumentus jau gamino. Sekančiais metais juos jau pardavinėjo Londone, Paryžiuje bei Italijoje.

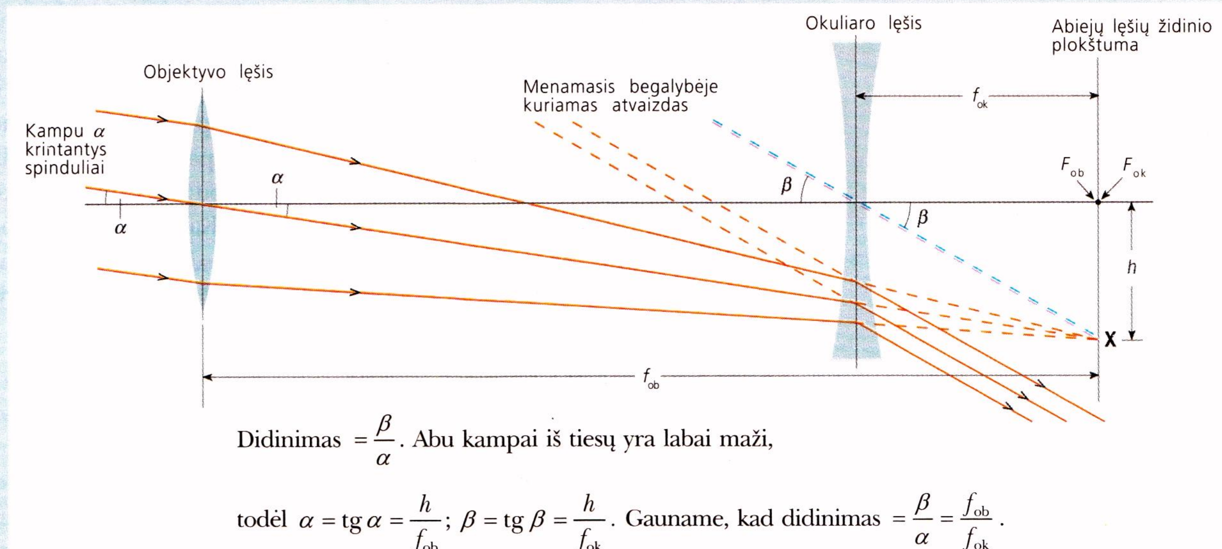
Galilėjus (*Galileo Galilei*) anuomet buvo vienas garsiausių „gamtos filosofų" Europoje – žodis „mokslininkas" tuo metu dar nebuvo vartojamas. Galilėjus net ir dabar laikomas vienas didžiausių visų laikų fizikų, be to, jis pasižymėjo ir savo sumanumu. Kai 1609 m. rugpjūčio mėnesį Galilėjus sužinojo, kad į Veneciją „atklydo" vienas „olandiško" vamzdelio egzempliorius, jis įstengė per vieną dieną ne tik išsiaiškinti jo veikimo principą, bet ir pasigaminti tris kartus didinantį teleskopą. Kitą dieną mokslininkas nuvyko pas savo darbdavius – Venecijos senatą, ir pasiūlė jiems prietaisą – teleskopą – kuris leistų jų flotilei pastebėti priešų laivus daug anksčiau negu tai galėtų padaryti priešai. Dėkingi senatoriai iš karto padvigubino Galilėjui algą, o jo pasiūlymą gavo keliomis dienomis anksčiau negu žiūronų gamintojai sukonstravo pirmuosius teleskopus ir ėmė jais prekiauti.

Toks vaisingas sprendimas Venecijos didžiosios pirklių respublikos senatorius labai pradžiugino ir jie nusprendė, kad fizikos ir matematikos profesorių, kuris sugebėjo aplenkti sumaniausius verslininkus, verta pasilikti, todėl pasiūlė sutartį, pagal kurią Galilėjus buvo įdarbintas iki gyvos galvos.

Nors Galilėjus nebuvo pirmasis teleskopą pagaminęs žmogus, tačiau jis pirmasis paaiškino šio prietaiso veikimo principą ir šiek tiek jį patobulino. Dėl to tokios konstrukcijos teleskopas buvo pavadintas jo vardu. 19.36 paveiksle pavaizduota, kaip Galilėjaus teleskopas sudaro atvaizdą. Priešingai vėlesniems – ir geresniems – astronominiams teleskopams, šis kuria neapverstą atvaizdą. Vienintelis šiuo metu tokios konstrukcijos instrumentas yra teatriniai žiūronai.

Su savo teleskopu Galilėjus įstengė įžiūrėti kalnus Mėnulyje, taip pat Jupiterio palydovus. Atlikti stebėjimai įtikino jį, kad senos pažiūros apie Visatos sandarą yra neteisingos: tvarka aukštybėse pasirodė esanti *netobula* – Saulė buvo Koperniko heliocentrinės sistemos – judančių Saulės sistemos planetų – centre. Katalikų Bažnyčios inkvizicijos tribunolas 1616 m. uždraudė jam ne tik skelbti savo mokslą, bet ir privertė viešai atsižadėti savo pažiūrų.

19.36 pav. **Galilėjaus teleskopas yra trumpesnis už tiek pat kartų didinantį astronominį teleskopą ir kuria neapverstą daikto atvaizdą. Objektyvo lęšio kuriamas atvaizdas sudaromas taške X, t. y. okuliaro pagrindinio židinio plokštumoje. Dėl to okuliaras tokio „menamojo daikto" spindulius ištiesina ir jo atvaizdą sudaro begalybėje**

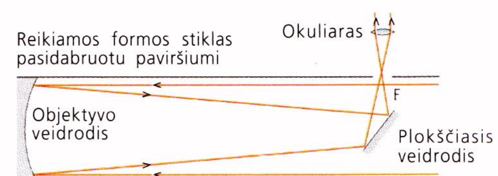


Didinimas $= \dfrac{\beta}{\alpha}$. Abu kampai iš tiesų yra labai maži,

todėl $\alpha = \operatorname{tg}\alpha = \dfrac{h}{f_{ob}}$; $\beta = \operatorname{tg}\beta = \dfrac{h}{f_{ok}}$. Gauname, kad didinimas $= \dfrac{\beta}{\alpha} = \dfrac{f_{ob}}{f_{ok}}$.

Veidrodiniai teleskopai

Kai kurių lęšinių teleskopų defektų galima išvengti naudojant vietoje objektyvo kreivus veidrodžius. Vienas įžymiausių tokios konstrukcijos instrumentų yra **Niutono veidrodinis teleskopas**.



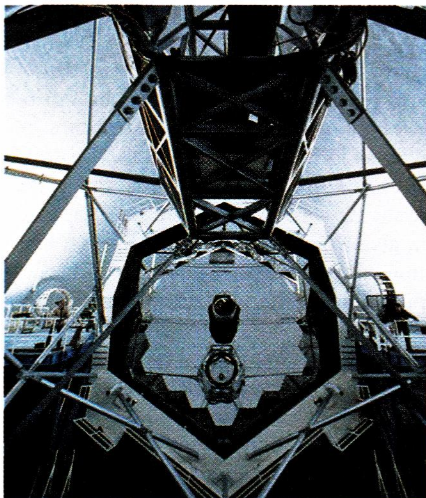
19.37 pav. **Niutono veidrodiniame teleskope vietoj objektyvo lęšio įtaisomas įgaubtasis veidrodis. Dėl to išvengiama chromatinės aberacijos**



L Kodėl Niutono teleskope nėra chromatinės aberacijos?

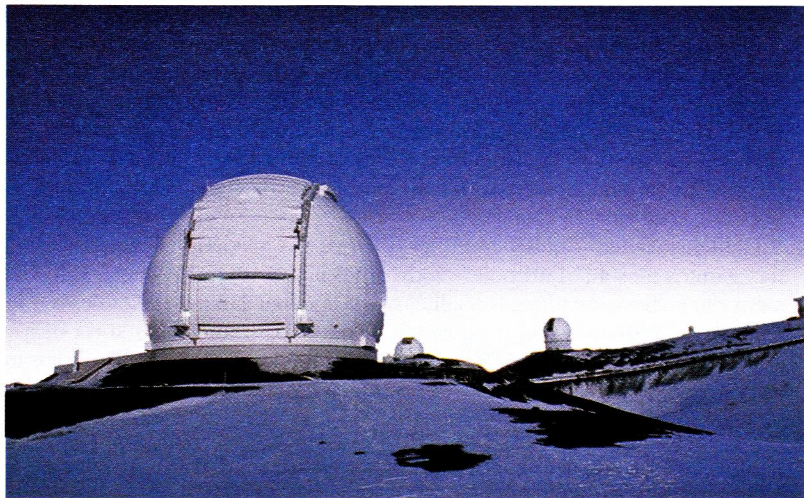
Žr. 12 klausimą.

19.38 pav. **Pasaulyje didžiausias veidrodinis teleskopas yra pastatytas Havajuose ant Mauna Kea kalno, užgesusio ugnikalnio viršūnėje 4200 m aukštyje. Jo pagrindinis veidrodis sudarytas iš 36 mažesnių aštuonkampių veidrodžių, kuriuos valdo kompiuteris. (Didžiausias vieno veidrodžio teleskopas yra Rusijoje, Zelenčiukskaja vietovėje Šiaurės Kaukaze. Jo skersmuo 6 m.)**



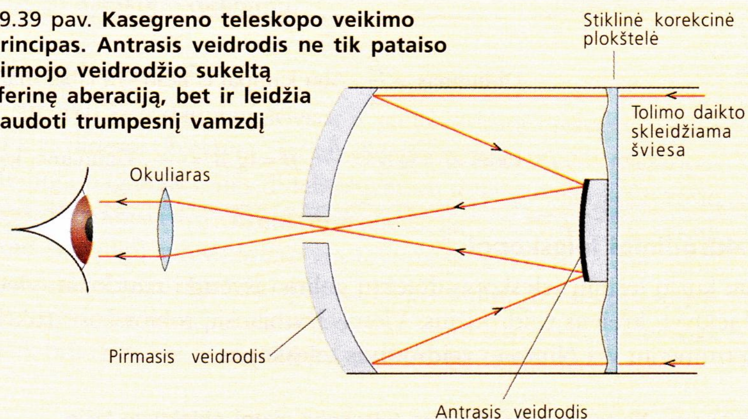
Paties didžiausio lęšinio teleskopo objektyvo lęšio skersmuo yra 1 m, o didžiausio Havajuose pastatyto (19.38 pav.) veidrodinio teleskopo objektyvo veidrodžio apertūra – apie 10 m. Tokiuose teleskopuose išvengiama chromatinės aberacijos, o sferinė aberacija panaikinama gaminant ne sferinės, o paraboloidinės formos veidrodžius. Šiuo metu teleskopų apertūra gali būti padidinta kompiuteriu, pavyzdžiui, kaip Mauna Kea teleskope (19.38 pav.).

Objektyvo veidrodis kuria tikrąjį tolimo daikto atvaizdą savo pagrindiniame židinyje F (19.37 pav.). Kad būtų patogiau stebėti, jis plokščiuoju veidrodžiu nukreipiamas į šoną, kur atitinkamame nuotolyje montuojamas ir okuliaras.



Kasegreno (*Cassegrain*) teleskopas

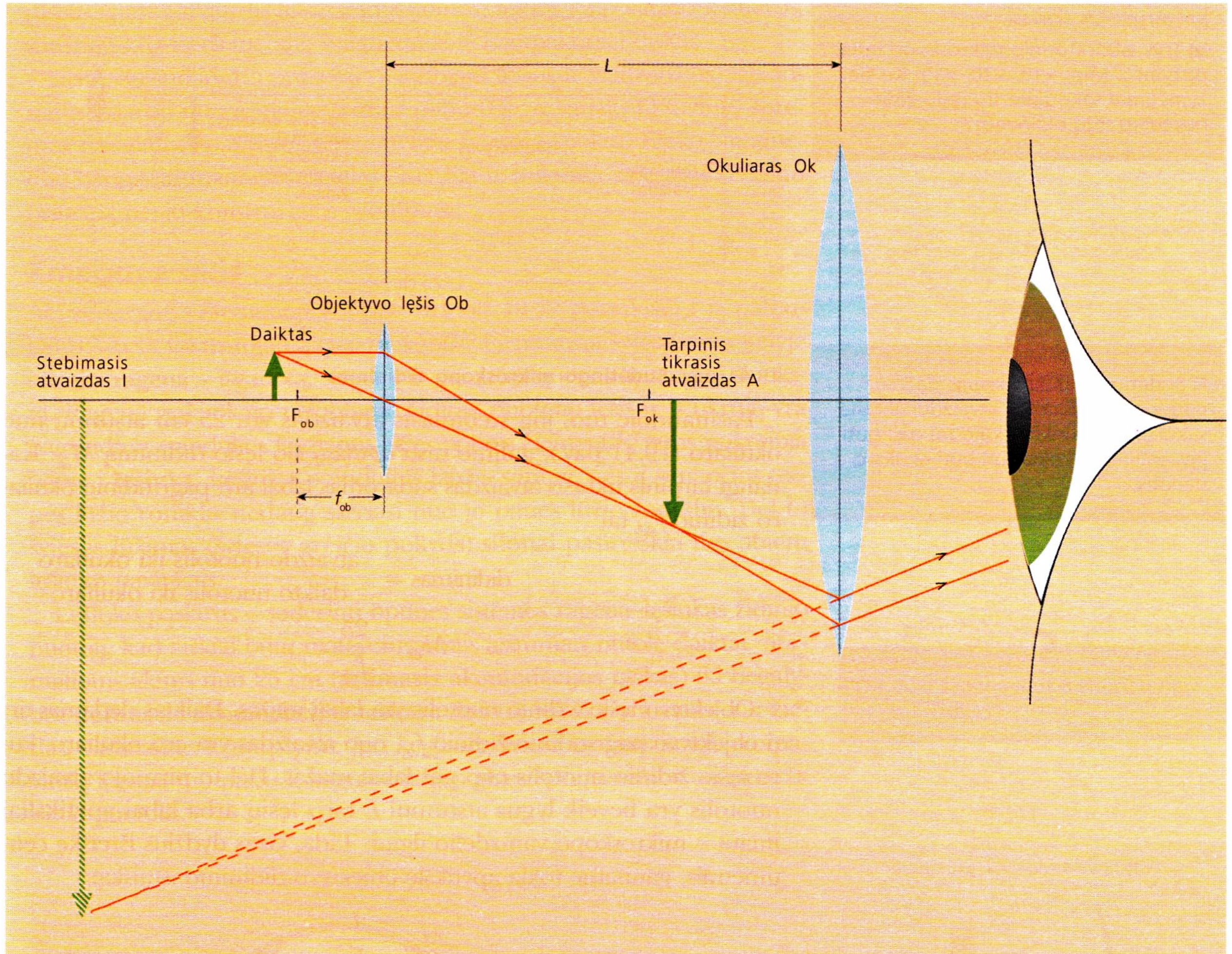
Išnagrinėti teleskopų pavyzdžiai rodo, kad norint pasiekti didelį didinimą, reikia naudoti didelio židinio nuotolio optinius elementus. Tai reiškia, kad stebėjimams tinkamas Niutono teleskopas bus per ilgas, ypač astronomams mėgėjams. Kasegreno sistema, kaip matyti 19.39 pav., įgalina sumažinti prietaiso ilgį. Tokio tipo teleskopuose naudojami du veidrodžiai. Antrasis, *iškilasis, veidrodis* tarsi pailgina pirmojo veidrodžio židinio nuotolį ir kuria atvaizdą nedidelėje ertmėje, padarytoje pagrindiniame veidrodyje. Kadangi techniškai sferinį veidrodį pagaminti reikiamu tikslumu yra daug lengviau nei parabolinį, tai Kasegreno teleskope pagrindinis veidrodis yra sferinis, tačiau priešais jį dar sumontuojama stiklinė *korekcinė plokštelė*. Tai sudėtingas lęšis, kurio paviršius sudarytas taip, kad kompensuotų veidrodžių sukeltus trūkumus.



19.39 pav. **Kasegreno teleskopo veikimo principas. Antrasis veidrodis ne tik pataiso pirmojo veidrodžio sukeltą sferinę aberaciją, bet ir leidžia naudoti trumpesnį vamzdį**

Sudėtingas mikroskopas

Sudėtingą mikroskopą sudaro du ir daugiau lęšių. Tokiu teleskopu sudaromas padidintas menamas labai mažo daikto atvaizdas. Mikroskopo surenkamas šviesos kiekis, priešingai nei teleskopo atveju, nėra labai svarbus, nes daiktas visada gali būti apšviestas tiek, kiek reikia. 19.40 paveiksle pavaizduota, kaip mikroskopas kuria daikto atvaizdą.



19.40 pav. **Sudėtingo mikroskopo veikimo principas. Tikrasis okuliaro kuriamas atvaizdas yra maždaug 25 cm atstumu nuo okuliaro ir akies, o tarpinis objektyvo kuriamas tikrasis atvaizdas yra arti okuliaro židinio**

Objektyvo lęšis Ob sukuria šiek tiek padidintą (tarpinį) tikrąjį daikto atvaizdą taške A. Šis taškas yra nutolęs nuo okuliaro Ok kiek mažiau nei okuliaro lęšio pagrindinis židinys, todėl tikrasis atvaizdas I yra menamasis ir stipriai padidintas. Paprastai mikroskopo optiniai elementai būna suderinti taip, kad atvaizdas sudaromas 25 cm atstumu nuo akies. Toks yra *geriausio matymo nuotolis*, kuriuo geriausiai įžiūrime pačias smulkiausias daikto detales (žr. toliau).

Sudėtingo mikroskopo didinimas

Sudėtingo mikroskopo didinimas priklauso nuo tikrosios stebimojo atvaizdo padėties. Ši padėtis priklauso nuo fokusavimo, o mikroskopas fokusuojamas keičiant daikto padėtį objektyvo lęšio atžvilgiu. Ne itin tiksliems skaičiavimams galima naudoti apytikslę didinimo formulę.



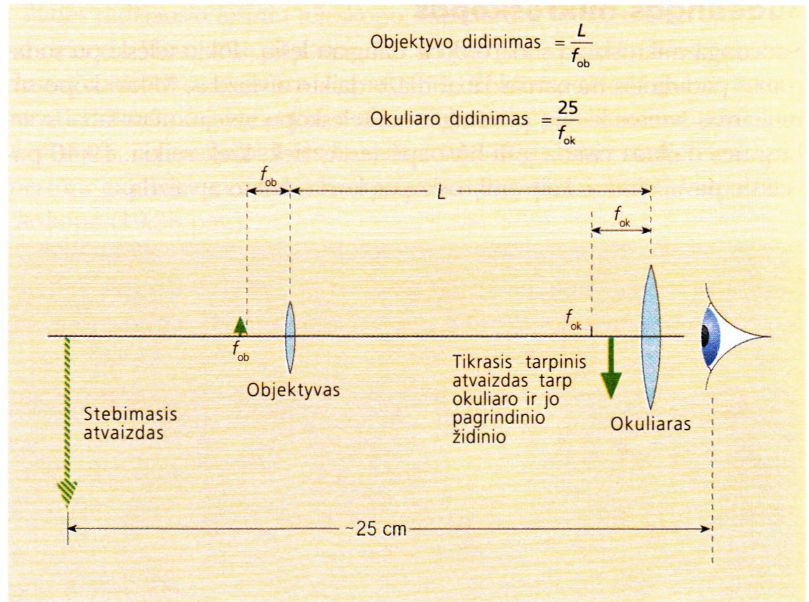
M Teleskopai paprastai konstruojami taip, kad jų didinimą būtų galima reguliuoti keičiant okuliaro padėtį (žr. K klausimą paraštėje). Tuo tarpu mikroskopai konstruojami taip, kad juos fokusuoti (ir keisti didinimą) būtų galima keičiant objektyvo lęšio padėtį.

a) Pagalvokite, kodėl šių prietaisų konstrukcijos skiriasi.

b) Trys laboratorinio mikroskopo lęšiai pažymėti taip: ×10, ×20, ×30. Ką šie žymėjimai sako apie šių lęšių židinio nuotolius ir jų didinimus?



N Sudėtingas mikroskopas dažnai naudojamas tikrajam atvaizdui ekrane sukurti. Paaiškinkite, kaip tai gali būti įgyvendinta ir kokia turi būti okuliaro padėtis.



19.41 pav. **Sudėtingo mikroskopo didinimas**

Pasinaudoję tuo, jog stebimasis atvaizdas yra 25 cm atstumu nuo okuliaro (19.41 pav.), galime rasti *apytikslį* šio lęšio didinimą M_{ok}. Kadangi tarpinis tikrasis atvaizdas sudaromas labai arti pagrindinio okuliaro židinio f_{ok}, tai

$$\text{didinimas} = \frac{\text{atvaizdo nuotolis iki okuliaro}}{\text{daikto nuotolis iki okuliaro}}$$

$$M_{ok} = \frac{25}{f_{ok}}$$

Objektyvo lęšio židinio nuotolis yra labai mažas. Daiktas dedamas arti objektyvo pagrindinio židinio f_{ob}, o jo atvaizdas yra arti okuliaro, kuro lęšio židinio nuotolis taip pat labai mažas. Dėl to pirmojo atvaizdo nuotolis yra beveik lygus atstumui L tarp lęšių arba labai apytiksliai imant – mikroskopo vamzdelio ilgiui. Tada, visus dydžius išreiškę centimetrais, gauname tokią apytikslę objektyvo didinimo išraišką:

$$M_{ob} = \frac{L}{f_{ob}}$$

Bendrą sudėtingo mikroskopo didinimą sąlygoja abiejų lęšių didinimas, todėl

$$M = M_{ob}M_{ok} = \frac{25L}{f_{ob}f_{ok}} \text{ (visi dydžiai išreikšti centimetrais).}$$

Žiūronai

Žiūronai iš tikrųjų yra ne kas kita kaip du teleskopai, po vieną kiekvienai akiai. Žiūronai didina analogiškai anksčiau išnagrinėtam astronominiam teleskopui. Jų konstrukcija šiek tiek skiriasi dėl praktinių sumetimų: visų pirma, žiūronų vamzdelis turi būti trumpas, antra, stebimasis atvaizdas turi būti neapverstas.

Šiems reikalavimams įvykdyti tinka atspindinčios prizmės (19.22 pav.). Šviesa praeina išilgai vamzdelio tris kartus, todėl šviesos spindulių optinis kelias yra maždaug tris kartus ilgesnis už žiūronų ilgį. Prizmės išdėstomos taip, kad jos apverstų sudarytą atvaizdą, todėl galutinis stebimas vaizdas yra neapverstas.

Žr. 13 klausimą. ■

7 ATVAIZDŲ FIKSAVIMAS

Bet kokiu optiniu (ar kitu atvaizdų sudarymo) prietaisu sukurti atvaizdai gali būti „pagauti“ ir išsaugoti įvairiausiais būdais. Pats dažniausias, tačiau turbūt pats sudėtingiausias yra biocheminis metodas, kuriuo veikia mūsų akys kartu su smegenimis. Fotocheminiais procesais yra pagrįstas fotojuostų ir fotoplokštelių veikimas. Šiuo metu atsiranda ir sparčiai plinta naujos atvaizdų fiksavimo sistemos, tokios kaip vaizdo kameros, surištųjų krūvių elementai, magnetiniai ir kompaktiniai diskai.

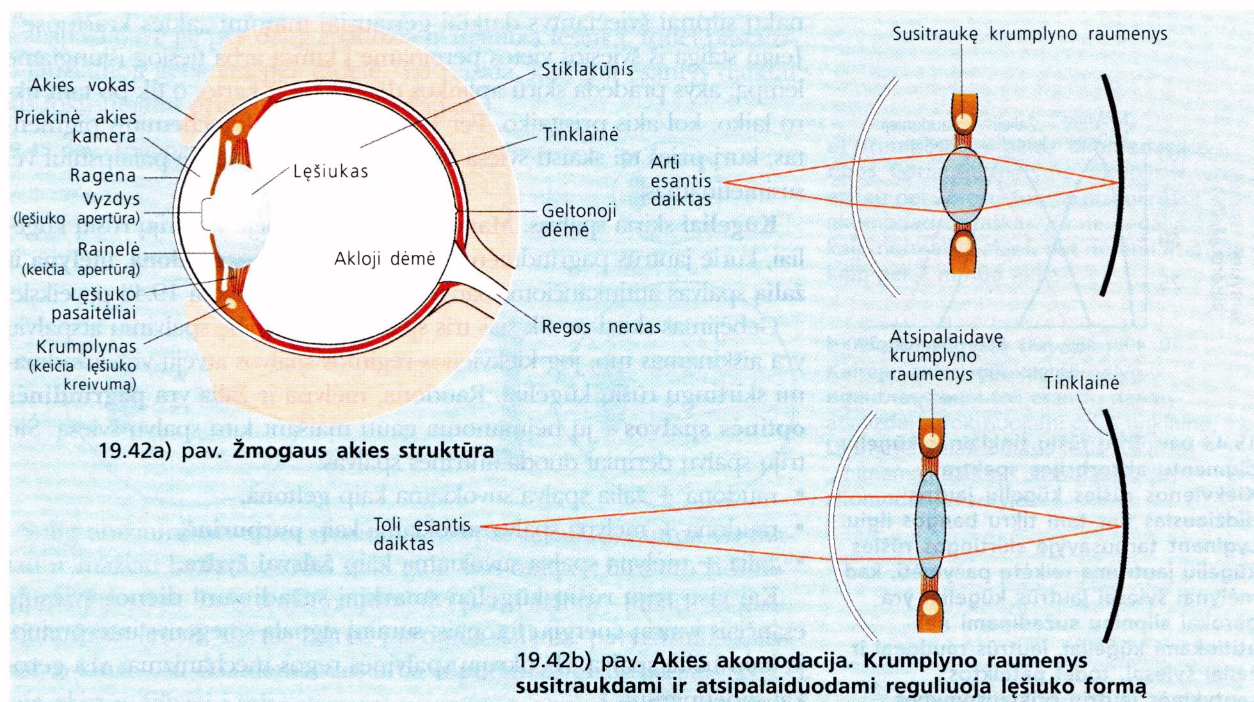
Atvaizdų sudarymo procesai (naudojant lęšius ir veidrodžius) labiausiai priklauso nuo *banginio* šviesos pobūdžio, o vaizdų fiksavimo sistemos daugiausia pagrįstos *korpuskuliniu* šviesos aspektu. Elektromagnetinę bangą atitinkančios dalelės energija ir nulemia prietaisų veikimo principą bei jų konstrukcijos ypatumus.

Žmogaus akis

Akį sudarantys elementai yra pavaizduoti 19.42 paveiksle. Į ją patenkanti šviesa fokusuojama dviem lęšiais. Pirmiausia šviesa savo kelyje sutinka **rageną** – išgaubtą, skaidrų ir gana tvirtą akies apsauginį sluoksnį. Ragena veikia kaip nekintamo židinio nuotolio lęšis ir iš tikrųjų yra pagrindinis spindulius laužiantis akies optinis elementas, kuris nukreipia šviesą į **lęšiuką**. Lęšiukas spindulius laužia silpnai, nes jį supančios terpės lūžio rodiklis nedaug skiriasi nuo jo paties lūžio rodiklio. Dėl to šviesos lūžimas (šviesos greičio pokytis) silpnai pasireiškia ties abiem lęšiuko paviršiais.

Lęšiuko paskirtis – suderinti optinės sistemos ragena–lęšiukas židinio nuotolį, kad aiškiai būtų matomi įvairiais atstumais nutolę daiktai, normalioms akims nuo 25 cm (**artimasis akomodacijos taškas**) iki begalybės (**tolimasis akomodacijos taškas**). Aplink lęšiuką yra raumenų žiedas, vadinamas **krumplynu**. Juo keičiama šviesą laužiančių lęšiuko paviršių forma, tuo pačiu ir reguliuojamas akies lęšių sistemos bendras židinio nuotolis.

? **O** Kodėl ragena laužia stipriau nei akies lęšiukas?



19.42a) pav. Žmogaus akies struktūra

19.42b) pav. Akies akomodacija. Krumplyno raumenys susitraukdami ir atsipalaiduodami reguliuoja lęšiuko formą

Lęšiuką reikiamoje padėtyje palaiko raiščiai – **lęšiuko pasaitėliai**, kurie prisitvirtinę prie krumplyno. Kai akis neįtempta, krumplyno raumenys atsipalaidavę, todėl lęšiukas išsitempia ir suplonėja. Tada normali akis kuria aiškų tolimo daikto (į akį krintantys spinduliai lygiagretūs) atvaizdą. Šiuo atveju optinės sistemos ragena–lęšiukas židinio nuotolis lygus akies ilgiui – maždaug 17 mm. Kai akis žiūri į arti esanti daiktą, tai į ją krinta išsisklaidantys spinduliai, kuriuos reikia šiek tiek suglausti, todėl krumplyno raumenys susitraukia, lęšiukas sustorėja tiek, kad ant tinklainės susidarytų aiškus sufokusuotas daikto atvaizdas. Lęšiuko formos kitimas vadinamas **akomodacija**, o šio kitimo sparta susijusi su grįžtamojo ryšio tarp akies ir smegenų greičiu.

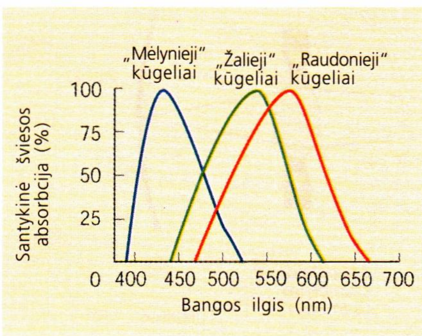
Į akį patekusios šviesos kiekis reguliuojamas **rainelėje**. Jos centre yra angelė, vadinama **vyzdžiu**. Rainelėje esantys raumenys reguliuoja vyzdžio dydį.

Pro lęšiuką praėjusi šviesa pasiekia vidinį akies obuolio dangalą, vadinamą **tinklaine**. Tinklainė sudaryta iš šviesai jautrių nervinių ląstelių – receptorių, turinčių dviejų rūšių ataugas, kurios dėl jų formos vadinamos **stiebeliais** ir **kūgeliais**. Šiuose yra šviesai jautraus pigmento (šviesą sugeriančios medžiagos). Kai tam tikros energijos (dažnio) fotonai pasiekia pigmentines molekules, jos sugeria energiją ir sukelia fotocheminę reakciją. Šios reakcijos metu molekulės greitai praranda energiją, tačiau sukuria elektrinį potencialą. Šis signalas nervinių ląstelių grandine, kuri yra viena iš daugelio **regos (optinio) nervo** skaidulų, perduodamas į smegenis.

Tinklainės centre, vienoje tiesėje su abiem akies lęšiais, yra rausvo atspalvio audinio plotelis, vadinamas **geltonąja dėme**. Šioje tinklainės vietoje akies skiriamoji geba yra didžiausia. Geltonojoje dėmėje yra vien tik kūgeliai. Tuo tarpu stiebeliai pasiskirstę labiau aplink geltonąją dėmę. Vidutinėje žmogaus akyje yra maždaug 125 milijardų stiebelių ir 7 milijardai kūgelių.

Žr. 16 klausimą. ■

Stiebeliai yra jautresni šviesos intensyvumo pokyčiams, tačiau jie neskiria skirtingo dažnio (fotonų energijos) šviesos, t. y. neskiria spalvų. Stiebeliai yra jautrūs silpnai šviesai, todėl jie ypač svarbūs tamsoje. Kadangi jų yra daugiau ne centre, o aplink tinklainės geltonąją dėmę, tai naktį silpnai šviečiantys daiktai geriausiai matomi „akies kraštuose“. Jeigu staiga iš šviesios vietos pereiname į tamsą arba tiesiog išjungiame lempą, akys pradeda skirti aplinkos detales ne iš karto, o tik po tam tikro laiko, kol akis prisitaiko. Per šį laiką stiebelių fotocheminis pigmentas, kurį prieš tai skaisti šviesa buvo suardžiusi, ląstelėje palaipsniui vėl susintetinamas.



19.43 pav. **Trijų rūšių tinklainės kūgelių pigmentų absorbcijos spektrai. Kiekvienos rūšies kūgelių jautris didžiausias ties tam tikru bangos ilgiu. Lyginant tarpusavyje skirtingos rūšies kūgelių jautrumą reikėtų pažymėti, kad mėlynai šviesai jautrūs kūgeliai yra gerokai silpniau sužadinami nei atitinkami kūgeliai, jautrūs raudonai ir žaliai šviesai, todėl pateiktos santykinės jautrių priklausomybės**

Kūgeliai skiria spalvas. Manoma, kad tinklainėje yra trijų rūšių kūgeliai, kurie jautrūs pagrindinėms spektro spalvoms – **raudoną**, **mėlyną** ir **žalią** spalvas atitinkančioms bangoms, kaip pavaizduota 19.43 paveiksle.

Gebėjimas skirti ne tik šias tris spalvas, o daugybę spalvinių atspalvių yra aiškinamas tuo, jog kiekvienos regimos spalvos atveju yra sužadinami skirtingų rūšių kūgeliai. Raudona, mėlyna ir žalia yra **pagrindinės optinės spalvos** – jų neįmanoma gauti maišant kitų spalvų šviesą. Šių trijų spalvų deriniai duoda antrines spalvas:

- raudona + žalia spalva suvokiama kaip **geltona,**
- raudona + mėlyna spalva suvokiama kaip **purpurinė,**
- žalia + mėlyna spalva suvokiama kaip **žalsvai žydra.**

Kai visų trijų rūšių kūgeliai smarkiai sužadinami dienos šviesoje esančiais įvairių energijų fotonais, suminį signalą smegenys interpretuoja kaip baltą spalvą. (Iš tikrųjų spalvinės regos mechanizmas yra gerokai sudėtingesnis.)

Akies defektai

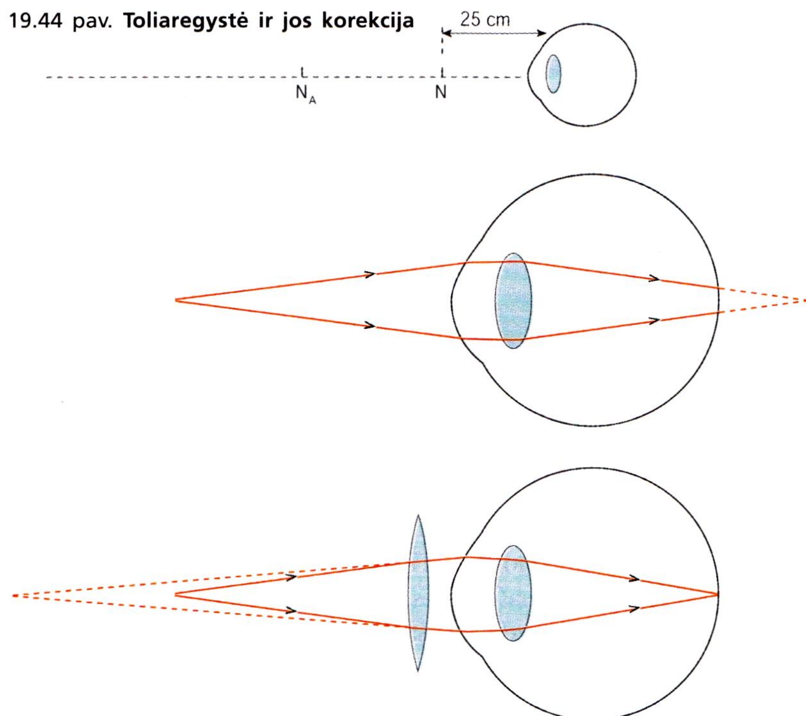
Artimasis akomodacijos taškas yra mažiausias atstumas, iš kurio mes aiškiai, neįtempdami raumenų įžiūrime daikto detales. Šį atstumą sąlygoja krumplyno raumenų stiprumas arba silpnumas (19.42 pav.). Artimojo taško nuotolis didėja su amžiumi: 10 metų vaikui šis nuotolis yra apie 18 cm, 20 metų jaunuoliams 25 cm, o 60 metų žmogui gali siekti 5 m.

Šis nuo amžiaus priklausantis defektas vadinamas **toliaregyste**, arba ***hypermetropia***. Akies lęšiukas yra suplotas, todėl artimi daiktai yra neryškūs, nes jų atvaizdai yra kuriami už tinklainės (19.44 pav.).

P a) Įvertinkite savo akies lęšių sistemos (ragena–lęšiukas) židinio nuotolį, kai žiūrite į daiktą, esantį 25 cm atstumu nuo akies, ir aiškiai jį matote.

b) Kam būtų galima pritaikyti 19.13 paveiksle pavaizduotą lęšį: trumparegiui ar toliaregiui?

19.44 pav. **Toliaregystė ir jos korekcija**



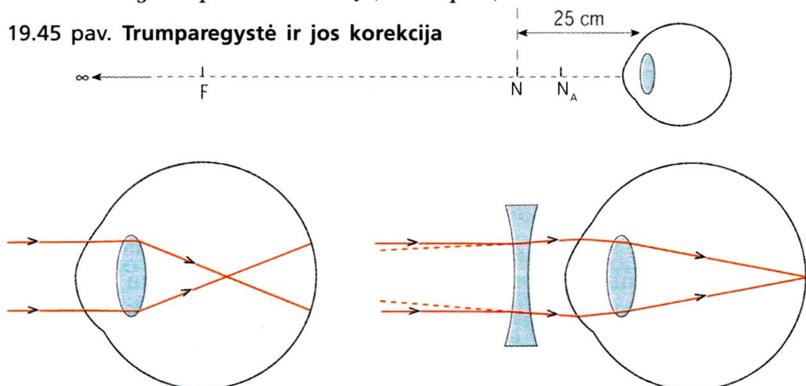
a) Normalios suaugusio žmogaus akies geriausio matymo taškas N yra 25 cm atstumu nuo akies. Silpnaregių akies lęšiukas nepakankamai sufokusuoja spindulius, ir šis taškas N_A esti nutolęs daugiau nei 25 cm nuo akies. Tolimasis akomodacijos taškas yra vis dar begalybėje, nebent krumplyno raumenys tiek silpni, jog lęšiukas visiškai suplonėjęs

b) Toliaregystė (hypermetropia): akies lęšiukas per silpnas, todėl artimų daiktų skleidžiamus spindulius neįstengia pakankamai suglausti ir sufokusuoti tinklainėje

c) Ištaisyta toliaregystė: glaudžiamasis lęšis sustiprina akies optinės sistemos glaudžiamąją gebą

Priešingai pasireiškiantis akies defektas vadinamas **trumparegyste**, arba ***myopia***. Šiuo atveju akies krumplyno raumenys yra per stiprūs, net ir atsipalaidavę jie per daug spaudžia ir išgaubia lęšiuką, todėl pastarojo laužiamoji geba yra per didelė. Tai reiškia, kad toli esantys daiktai bus fokusuojami prieš tinklainę (19.45 pav.).

19.45 pav. **Trumparegystė ir jos korekcija**



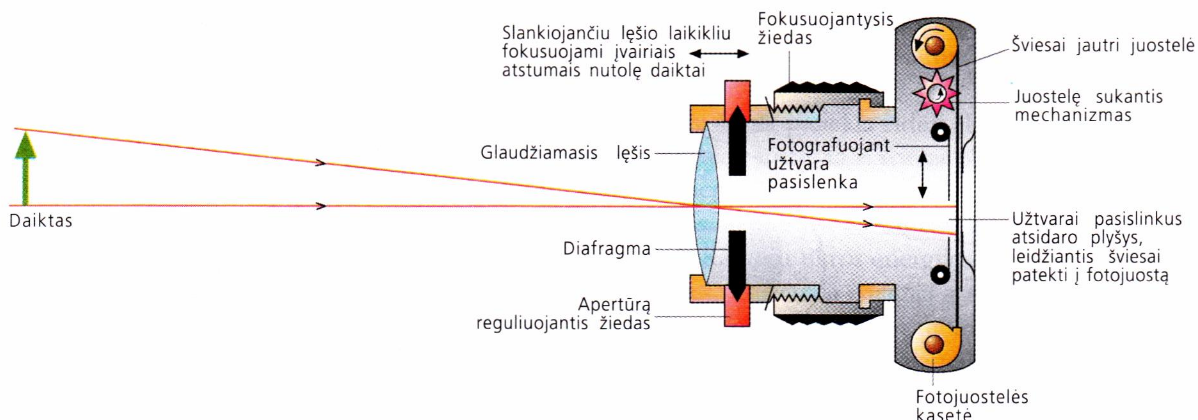
a) Trumparegės akies akomodacijos ribos. Geriausio matymo nuotolis N_A yra arčiau nei 25 cm. Tuo tarpu tolimasis akomodacijos taškas yra ne begalybėje, kaip normalios akies, bet neretai ir arčiau kaip per 1 m nuo akies

b) Trumparegystė (*myopia*). Kairėje: akies lęšiukas pernelyg išgaubtas, todėl toli esančių daiktų atvaizdai sufokusuojami prieš tinklainę. Dešinėje: sklaidomasis lęšis sukuria „menamąjį daiktą" arčiau akies, jos akomodacijos srityje

Sulig amžiumi visi akies elementai, o ypač lęšiukas, tampa vis mažiau ir mažiau lankstūs, todėl galų gale akis tampa „fiksuoto židinio" optiniu prietaisu. Tada tenka naudoti dvi poras akinių – vienus su glaudžiamaisiais lęšiais, skirtus žiūrėti į artimus daiktus, pavyzdžiui, skaitymui, o kitus – su sklaidomaisiais arba silpnesniais glaudžiamaisiais lęšiais, skirtus žiūrėti į tolį.

Bet kurio amžiaus žmogaus akies lęšis gali turėti defektą, vadinamą **astigmatizmu**. Taip būna tada, kai akis negali tuo pat metu sufokusuoti atvaizdo vertikalioje ir horizontalioje ašyse. Pavyzdžiui, dėl tokio defekto taškinis šviesos šaltinis labiau panašus į šviečiančią atkarpą. Taip yra dėl netaisyklingos lęšiuko formos: jo horizontalusis kreivumo spindulys nelygus vertikaliajam kreivumo spinduliui. Astigmatizmui ištaisyti naudojami lęšiai, kurių kreivumo spinduliai parenkami taip, kad visiškai kompensuotų lęšiuko iškraipymus.

Fotoaparatai



19.46 pav. **Fotoaparato sandara. Lęšis paprastai yra storesnis, nes, siekiant susilpninti aberacijas, jis sudarytas mažiausiai iš dviejų dalių**

?

Q Nurodykite svarbiausius fotoaparato ir akies vienodos paskirties elementus. Nurodykite, kuo skiriasi jų veikimo principai (išskyrus tai, kad vienas jų mechaninės, o kitas – biologinės kilmės).

Fotoaparatai – tai optiniai prietaisai, naudojami daikto atvaizdui kurti ir fiksuoti šviesai jautrioje juostoje. Tipinio fotoaparato ar kino kameros konstrukcija yra labai panaši į akies sandarą, juose automatizuoti netgi tokie procesai, kaip atvaizdo fokusavimas bei į vidų patenkančio šviesos kiekio reguliavimas. Skirtumas tik toks, kad fokusuojama ne keičiant lęšių formą, kaip akyje, o paslenkant visą lęšių sistemą išilgai pagrindinės optinės ašies: šiuo būdu keičiamas atstumas tarp lęšio ir šviesai jautrios juostelės. Siekiant išvengti chromatinės aberacijos, fotoaparato lęšis paprastai daromas sudėtinis – mažiausiai iš dviejų dalių. Be to, jų kreivumai būna pakoreguoti taip, kad ir kitų rūšių aberacijos pasireikštų kuo silpniau. Akies vyzdžio funkciją fotoaparate atlieka **apertūra**, o jos dydis reguliuojamas mechaniniu rainelės atitikmeniu – **diafragma**, sudaryta iš viena kitą dengiančių slankių metalinių plokštelių.

Nesvarbu, ar prietaisas naudojamas momentiniams vaizdams fiksuoti (fotoaparatas), ar kaip kamera, atvaizdas sudaromas tuo pačiu principu. Skiriasi tik atvaizdo įrašymo ir jo vaizdavimo būdas.

Fotografinė juostelė yra sudaryta iš keleto šviesai jautrių dažų sluoksnių. Skirtingų fotonų energijų šviesa sukelia chemines reakcijas tas energijas (t.y. spalvas) atitinkančiuose dažuose. Šie cheminiai pokyčiai tampa regimi *išryškinus* juostelę chemikalais. Naudojami tokie dažai, kurie kaip galima tiksliau atkartoja į fotoaparatą patekusios, atvaizdą sudarančios šviesos spalvas. Visos įmanomos spalvos gali būti sukurtos naudojant tik trijų spalvų dažus: raudonus, geltonus ir mėlynus.



19.47 pav. **Padidintas skaidrios plėvelės gabalėlis. Joje matyti geltonos, raudonos ir mėlynos spalvos siauros juostelės, panašiai kaip ir televizoriaus ekrane. Žiūrint iš didesnio atstumo, juostelės susilieja ir regime tam tikrą spalvą. Skirtingais tų juostelių deriniais galima gauti visas regimo spektro spalvas**

Kino kamera kuria atvaizdus taip pat ant panašios fotografinės juostelės, tik atvaizdai fiksuojami vienas po kito 24 kadrų per sekundę greičiu. Kai juostelė išryškinama ir jos užfiksuoti atvaizdai projektuojami ekrane tokiu pat greičiu, regimas vaizdas suvokiamas kaip nenutrūkstamas. Taip yra todėl, kad akis pasižymi inertiškumu – galimybe, išnykus vaizdui, „regėti“ jį dar 1/7–1/10 s. Jeigu vaizdai keičia vienas kitą daž-

niau kaip 10 kartų per sekundę, žmogus mato vieną tolygiai kintantį vaizdą ir nepastebi, kada regimi vaizdai „susijungia“.

Vaizdo kamera veikia tokiu pačiu principu kaip ir kino kamera, tik atvaizdas įrašomas ne cheminiu, o elektroniniu būdu: atvaizdą sudarantys taškai atitinkamais elektriniais signalais įrašomi į magnetinę juostą.

Surištųjų krūvių elementai

Šiuo metu plačiai naudojamos nešiojamosios **filmavimo kameros**, kuriose sujungti du įrenginiai: vaizdo kamera ir vaizdą į magnetinę juostą įrašantis įtaisas. Vaizdo kamerų svarbiausias elementas yra **surištųjų krūvių įtaisas (SKĮ)** (*charge coupled device, CCD*). SKĮ sudarytas iš daugybės labai mažų šviesos detektorių. Tipinis nedidelis SKĮ sudarytas iš 385×578 tokių elementų, sumontuotų ant plono silicio sluoksnio.

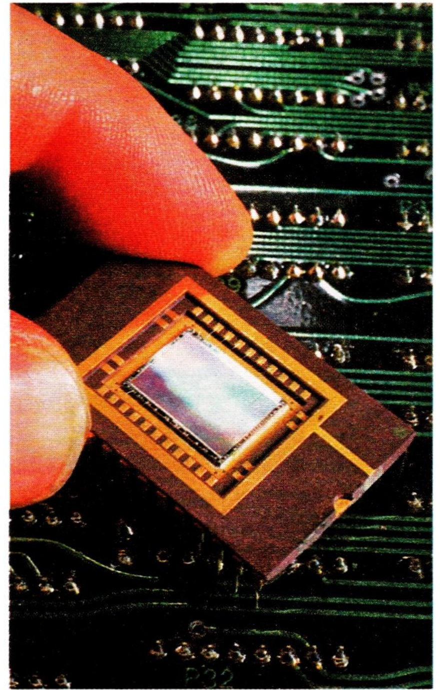
Kai fotonas krinta į šį sluoksnį, sukuriama elektrono ir skylės pora (žr. 118 p.). Elemento elektrode kaupiamas visas į tą vietą kritusių fotonų sukurtas krūvis, kuris, aišku, priklauso nuo šviesos intensyvumo. Po tam tikro trumpo laiko tarpo elektrodų sukauptas krūvis programiškai nustatyta tvarka yra nuskaitomas. Tada sukuriamas atitinkamas elektrinis signalas, kuriame užkoduojamas į įtaiso paviršių kritusios šviesos struktūra, todėl vėliau pagal jį gali būti atkurtas daikto atvaizdas.

Norint gauti spalvotų paveikslų skaitmeninį įrašą, kiekviename taške reikia turėti po tris šviesai jautrias sritis su skirtingais filtrais (raudonu, žaliu, mėlynu). Tik tuomet galima sukurti sudėtingą signalą, kuriame būtų sukaupta ne tik šviesos intensyvumas, bet ir spalvinė informacija.

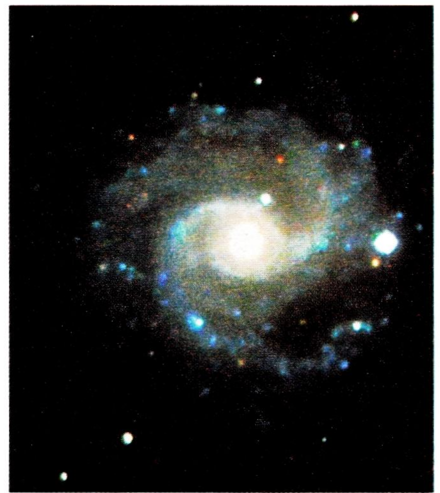
SKĮ yra jautrūs šviesai, kurios bangos ilgiai yra nuo 400 nm (violetinė) iki 1000 nm (infraraudona). Didžiausias tokių įtaisų panaudojimo moksliniuose tyrimuose ar TV prietaisuose privalumas – jų efektyvumas. Atvaizdui sudaryti fotografinėje plokštelėje panaudojama vos 4% ją pasiekusių fotonų. (Akies efektyvumas yra dar mažesnis – ja užregistruojamas kas šimtasis fotonas). Visi kiti fotonai nepataiko į juostelėje esančias šviesai jautrius grūdelius arba tiesiog neįstengia sukelti pakankamai stiprių cheminių pokyčių. Tuo tarpu SKĮ atvaizdui sudaryti panaudojama iki 70% visų kritusių fotonų, iš dalies dėl to, kad detektoriai perdengia santykinai didesnį paviršių, tačiau daugiausia dėl to, kad elementai yra jautresni už chemikalus.

Astronomijoje šviesos (t.y. surištųjų krūvių) kaupimo trukmė gali būti gerokai ilgesnė nei TV kamerose, todėl po kurio laiko pradeda ryškėti blyškių dangaus objektų detalės, kurios nepastebimos kitais metodais. Kadangi SKĮ efektyvumas didelis, tai ryškiam atvaizdui gauti reikalinga daug mažesnė eksponavimo trukmė negu fotografuojant. Be to, išėjimo srovės stipris yra proporcingas kritusių fotonų skaičiui, todėl žvaigždžių šviesis bei spektrinių linijų intensyvumas gali būti išmatuoti daug tiksliau negu fotografiniais metodais.

Vis dėlto fotografinės plokštelės šviesai jautrūs grūdeliai yra mažesni už SKĮ elementus, todėl fotografinių atvaizdų skyra yra geresnė. Taip pat SKĮ plitimą stabdo tai, jog didžiausi pramoniniu būdu gaminamų tokių įtaisų matmenys yra apie 7 mm. Tai reiškia, jog registruojamas atvaizdas turi būti mažas. Tiesa, atskirus SKĮ kuriamus atvaizdus galima sujungti į vieną didelį, tačiau tam reikia papildomų aukštos technologijos įrenginių. Nežiūrint visų trūkumų ir privalumų, panašu, kad SKĮ technologija jau netolimoje ateityje sulauks dar didesnio pripažinimo.



19.48 pav. **Surištųjų krūvių įtaiso pavyzdys. Centriniame stačiakampyje yra daug tūkstančių šviesai jautrių elementų. (Mažas įtaisas padėtas virš sumontuotos elektrinės grandinės plokštelės, kad geriau suvoktume jo matmenis.)**



19.49 pav. **Spiralinės galaktikos NGC 3184 atvaizdas, gautas tokiu įtaisu. Jis gali kaupti šviesos fotonus ilgą laiką, todėl atvaizde išryškėja smulkios objekto detalės**

Vienas nanometras (žymimas „nm“) yra lygus 10^{-9} m.

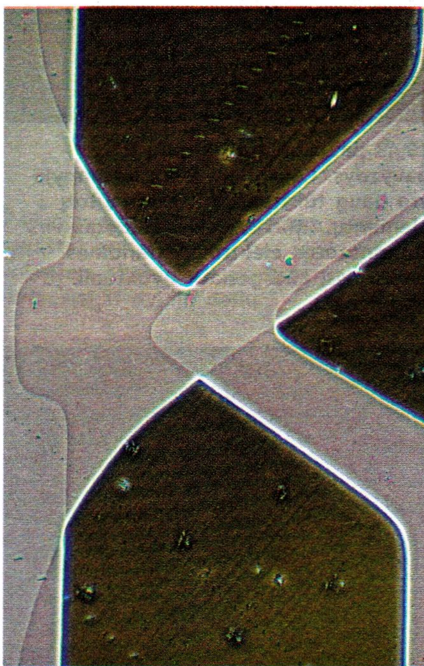
■ Žr. 14 klausimą.

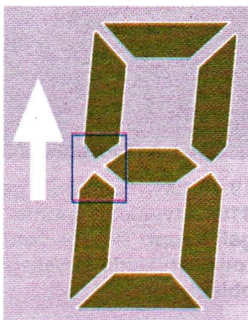
Vaizduokliai

Šiuo metu daug reikalingos informacijos peržvelgiame arba perskaitome įvairios paskirties vaizduokliuose. Pavyzdžiui, pasaulyje vykstančius įvykius mes dažniausiai pamatome TV imtuvų ekranuose. Asmeninių kompiuterių vaizduokliai tampa vis svarbesniu įvairiapusio bendravimo tarpininku, nes plėtojant informacines technologijas kasdieniai ryšiai elektroninėmis pašto sistemomis darosi tokie įprasti, kokie iki šiol buvo spausdintiniai informacijos šaltiniai. Informacijai perteikti ekrane naudojami dviejų tipų vaizduokliai. Vieni konstruojami **katodinių spindulių vamzdžio** (KSV) pagrindu, kuriuose pagreitinti elektronai smogia į fosforu padengtą ekraną ir priverčia jį švytėti. Kito tipo vaizduokliuose pasinaudojama skystų kristalų savybe poliarizuoti šviesą, todėl jie ir vadinami **skystųjų kristalų vaizduokliais** (SKV).

Žr. 15 klausimą. ■

19.50 pav. **160 kartų padidintas skaičiuoklio skystųjų kristalų indikatoriaus elementas**





Katodinių spindulių vamzdis

Katodinių spindulių vamzdžiai su fosforescuojančiu ekranu yra pati seniausia vaizdų atkūrimo priemonė. Pati sąvoka „katodiniai spinduliai“ buvo suteikta dar tuo laiku nežinomų dalelių, kurios iš tikrųjų yra elektronai, srautams. Ekraną pasiekę elektronai perduoda savo kinetinę energiją fosforo dangai, kuri pradeda švytėti.

KSV yra ne tik labiausiai paplitę įprastų TV imtuvų, radiolokatorių ar kompiuterių vaizduoklių sudėtinė dalis – jie taip pat sėkmingai panaudojami laboratorinėje įrangoje, pavyzdžiui, katodinių spindulių osciloskopuose. Tačiau šie įrenginiai turi ne vieną trūkumą. Vienas svarbiausių jų yra tai, kad prarandama labai daug energijos elektronų šaltiniui kaitinti. Be to, norint elektronus įgreitinti iki tokios energijos, kad jie galėtų sužadinti fosforą, tenka vamzdeliuose naudoti ne žemesnę kaip 2 kV įtampą. Nepaisant šių trūkumų, KSV technologija yra gerai ištirta ir ištobulinta, todėl artimiausiu laiku tokių vamzdžių pagrindu veikiantys vaizduokliai bus plačiai naudojami.

Skystųjų kristalų vaizduoklių ekranai

Daugelyje nešiojamų prietaisų, tokių kaip kalkuliatoriai, laikrodžiai ar nešiojamieji kompiuteriai, naudojami **skystųjų kristalų vaizduokliai**. Skystųjų kristalų taikymas vaizdų kūrimui aprašytas 124 puslapyje.

Trumpai aptarsime tokio vaizduoklio veikimo principą. Kristalai pasižymi tuo, jog gali poliarizuoti šviesą. Dėl to jie gali nepraleisti (arba praleisti) tam tikra kryptimi poliarizuotos šviesos. Poliarizuojamasis kristalų poveikis gali būti valdomas elektriniu lauku. SKV ekranas yra sudarytas iš mažų skystų kristalėlių, kuriais padengtas paviršius, galintis spinduliuoti tam tikro dažnio ir poliarizacijos šviesą. Prijungus valdantįjį elektrinį lauką kristalėliams galima elektroniniu būdu pranešti, ar praleisti iš apačios sklindančią šviesą, ar ją sulaikyti. Šiuo būdu kristalėlių matrica gali būti valdoma duomenų srautu, panašiai kaip ir TV imtuvo katodinių spindulių vamzdyje.

Kiekvienas kristalėlis prijungiamas prie **plonos tranzistorinės dangos** – tam tikros mikroschemos, kurios paviršiaus plotas didelis. Tame plote sumontuota daug tūkstančių tranzistorių, kurie kontroliuoja kiekvieną kristalėlį. Tuo būdu ekrane sukurtą atvaizdą galima „atnaujinti“ daug tiksliau ir dažniau nei katodinio vamzdžio atveju. Kai tokio tipo vaizduokliai taps pigesni ir didesni, jie neabejotinai pakeis katodinių vamzdžių vaizduoklius.

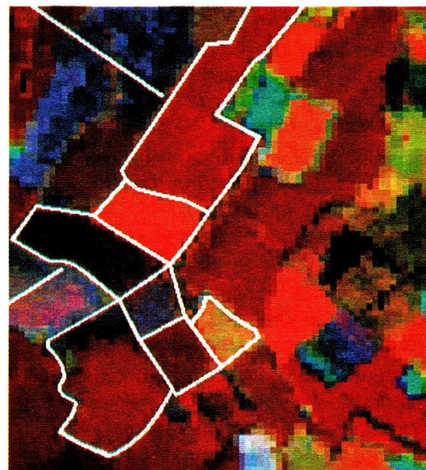


R Palyginkite skystųjų kristalų ir katodinių spindulių ekranų naudojimo vaizdų kūrimui privalumus ir trūkumus.

8 UŽ REGIMOJO SPEKTRO RIBŲ

Atvaizdas yra *informacinis* įrašas. Ši informacija bendrai sutarta tvarka užkoduojama skaitmeniniu būdu (žr. 138 p.). Pavyzdžiui, skaitytuvas kiekvieno taško šviesos intensyvumui ir spalvai priskiria skaičių ar jų seką, tuo būdu skaitomas paveikslas paverčiamas duomenų srautu, kuris išsaugomas kompiuteryje.

Svarbiausia atvaizdų panaudojimo ypatybė yra ta, jog realus daiktas reikalingas tik tuo momentu, kai kuriamas jo atvaizdas. Dar daugiau – akimi regimam atvaizdui sukurti gali būti panaudotos ne tik regimosios šviesos, bet ir viso elektromagnetinio spektro spinduliuočių bangos. Pavyzdžiui, jau daugelį metų rentgeno, ultravioletinio ir infraraudonojo diapazono spinduliuotės buvo naudojamos regimiems atvaizdams fotografinėje juostelėje sukurti. Šiuo metu atvaizdus galima sukurti ne tik elektromagnetinėmis bangomis – tam gali būti panaudojamas garsas, elektronai (jų tankio kitimas) arba net menki branduolių magnetinių laukų svyravimai (žr. toliau).



19.51 pav. **Žemės ūkio pasėlių planas, nufotografuotas iš dirbtinio Žemės palydovo. Nuo planetos paviršiaus atspindėta raudonoji ir infraraudonoji spinduliuotės kinta priklausomai nuo augančių javų rūšies. Kompiuteris šiuos skirtumus pavaizduoja skirtingomis spalvomis**

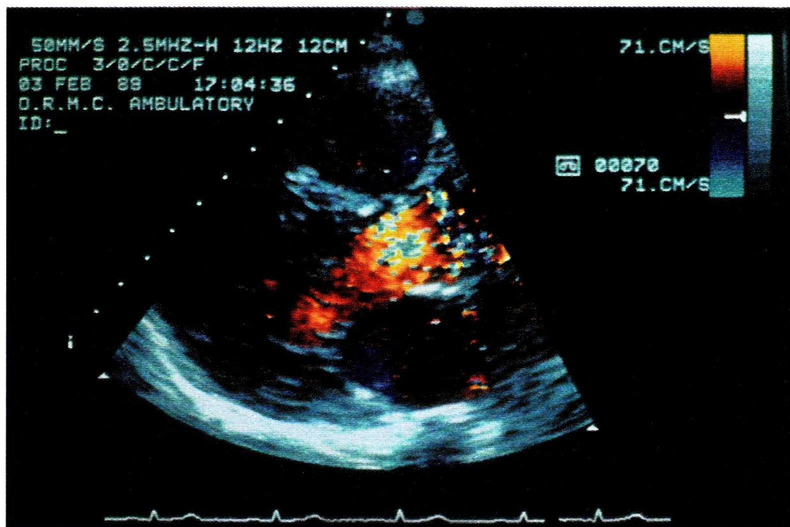
Ultragarsas

Echoskopai – **ultragarsiniai** skaitliai – šiuo metu medicinoje įprasta žmogaus organizmo sutrikimų tyrimo ir gydymo priemonė. Ultragarsas yra labai aukštų dažnių (mažų bangos ilgių) garso bangos. Šių bangų atspindys ir sugertis priklauso nuo švitinamo kūno audinio savybių, dėl to, parinkus bangų dažnį, sklidimo kryptį ir švitinimo vietą, gali būti gauti ir vidinių organų atvaizdai. Plačiau apie ultragarsą skaitykite 207 puslapyje.

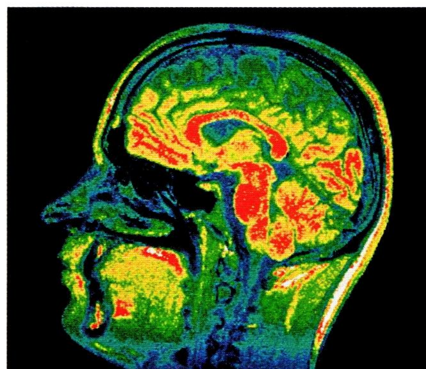
Branduolių magnetinio rezonanso metodas

Šiuo metu medicinoje naudojami dar vienos rūšies gerokai brangesni skaitytuvai. Dažnai jais gali būti išanalizuotos daug smulkesnės kūno sistemų dalys. Šių skaitytuvų veikimas pagrįstas atomų branduolių magnetinėmis savybėmis, todėl metodas vadinamas branduolių magnetinio rezonanso spektrometrija. (Plačiau apie tai 214 puslapyje.) Šio metodo privalumas yra tai, jog naudojamos mažo intensyvumo elektromagnetinės bangos, kurios neveikia biologinių audinių.

■ Žr. 17 klausimą.



19.52 pav. **Echoskopu ištirtos sveikos širdies atvaizdas. Trys apvalios formos sritys yra širdies skilveliai. Oranžine spalva nuspalvintas tarp dviejų skilvelių tekantis kraujas**



19.53 pav. **Skersinis žmogaus galvos atvaizdas, gautas branduolių magnetinio rezonanso metodu. Nuotraukoje aiškiai matyti smegenų struktūra, oro takai ir veido audiniai (spalvos neatitinka tikrovės, kad būtų vaizdžiau (ir gražiau), skirtingas sritis kompiuteris „nuspalvina")**



S Elektrono impulso momentą su jo bangos ilgiu λ sieja de Broilio (*de Broglie*) formulė $p = h/\lambda$, kur h yra Planko konstanta.

a) Remdamiesi šiuo sąryšiu paaiškinkite, kodėl, norint gauti trumpesnių ilgių bangas, elektroniniame mikroskope reikia naudoti didesnę greitinančiąją įtampą.

b) Įvertinkite tipiniame elektroniniame mikroskope įgreitintų elektronų impulso momentą ir jų kinetinę energiją.

c) Remdamiesi b) dalies atsakymu apskaičiuokite elektroninio mikroskopo greitinančiąją įtampą. Papildomi duomenys: elektrono masė $9{,}1 \times 10^{-31}$ kg, $h = 6{,}6 \times 10^{-34}$ J · s, elementarusis krūvis $e = 1{,}6 \times 10^{-19}$ C.

9 LABAI MAŽŲ DAIKTŲ ATVAIZDAVIMAS

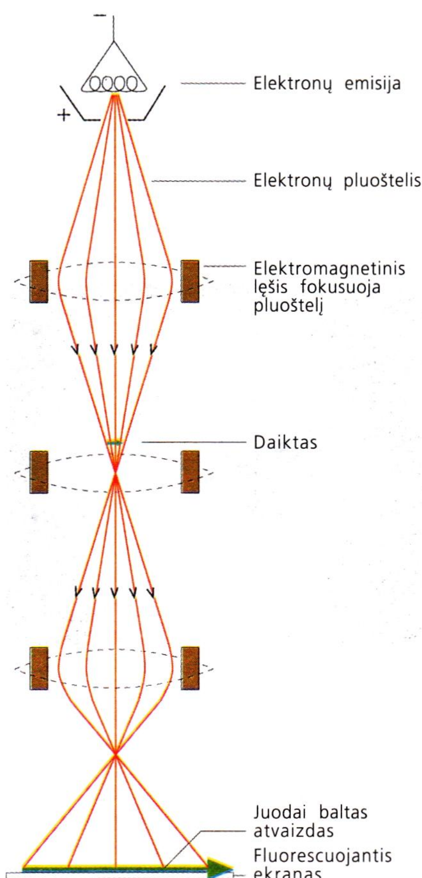
Kvantinė mechanika padarė turbūt patį netikėčiausią mokslo atradimą, kurį keliais žodžiais galima nusakyti taip: kadangi šviesos bangos pasižymi dalelių (korpuskulinėmis) savybėmis, tai dalelės – atvirkščiai – turėtų pasižymėti banginėmis savybėmis (žr. 35 p.). Mintis, kad elektronus – kaip bangas – galima panaudoti atvaizdų kūrimui lygiai tokiu pat būdu kaip ir šviesos bangas, padėjo išrasti **elektroninį mikroskopą**.

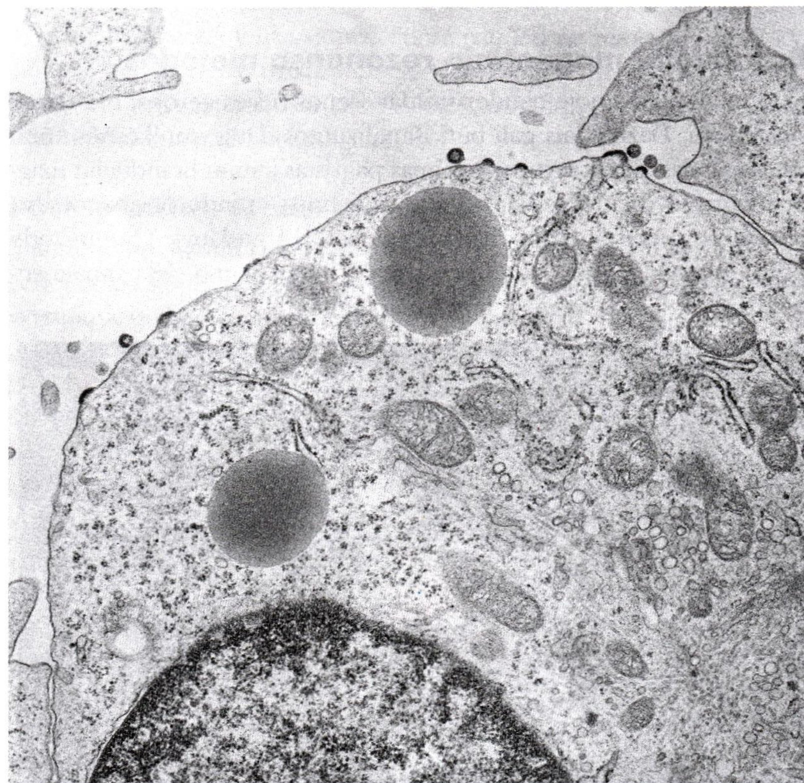
Pagrindinė problema sudarant bet kokį atvaizdą elektromagnetinėmis bangomis – difrakcija (žr. 17 p.). Difrakcija nulemia atvaizdo skyrą, t. y. mažiausią atstumą tarp dviejų daiktų (ar jo smulkių dalių), kai jie atvaizde dar matomi skyrium. Ribinę optinio prietaiso, pavyzdžiui, teleskopo ar mikroskopo, skyrą nusako Relėjaus (*Rayleigh*) dėsnis (žr. 419 p.). Pagal šį dėsnį vienas iš svarbiausių parametrų, nuo kurio priklauso atvaizdo aiškumas, yra bangos ilgis – kuo jis trumpesnis, tuo geriau.

Regimosios šviesos bangų ilgiai yra kelių šimtų nanometrų eilės (3–7) $\times 10^{-7}$ m. Šiame diapazone mėlynos šviesos bangos ilgis yra mažiausias, tačiau ultravioletinė spinduliuotė (t.y. jau už regimosios spektro srities ribos) taip pat dar gali būti naudojama fotomikrografijoje.

Tuo tarpu elektroniniame mikroskope elektronai, prieš susidurdami su analizuojamu taikiniu, yra įgreitinami. Kuo didesnis jų greitis, tuo trumpesnio ilgio bangas jie atitinka (žr. 36 p.). Tipinis elektrono bangos ilgis šiuolaikiniuose elektroniniuose mikroskopuose yra apie 10^{-11} m – t. y. maždaug 10 000 kartų mažesnis už regimosios šviesos bangos ilgį. Dėl to tokių mikroskopų skyra yra 10 000 kartų geresnė.

19.54a) pav. **Peršviečiamojo elektroninio mikroskopo veikimo principas. Elektronų pluoštelius fokusuoja stiprūs ričių sukurti magnetiniai laukai, panašiai kaip TV imtuvo katodiniame vamzdelyje. Banginės elektronų savybės įgalina sukurti stebimo daikto padidintą atvaizdą**





19.54b) pav. **Peršviečiamuoju elektroniniu mikroskopu gautas padidintas baltojo kraujo kūnelio (leukocito) atvaizdas. Tamsus kūnelio branduolys matomas atvaizdo apatinėje dalyje. Tokios ląstelės skirtos kovoti su infekcija, tačiau ši pati yra užkrėsta žmogaus imunodeficito virusu. Viruso dalelės (nedideli tamsūs rutuliukai) dauginasi šioje ląstelėje, ir paveikslo viršutinėje dalyje galima matyti, kaip jos ardo baltojo kūnelio sieneles**

Skaitantysis tunelinis mikroskopas

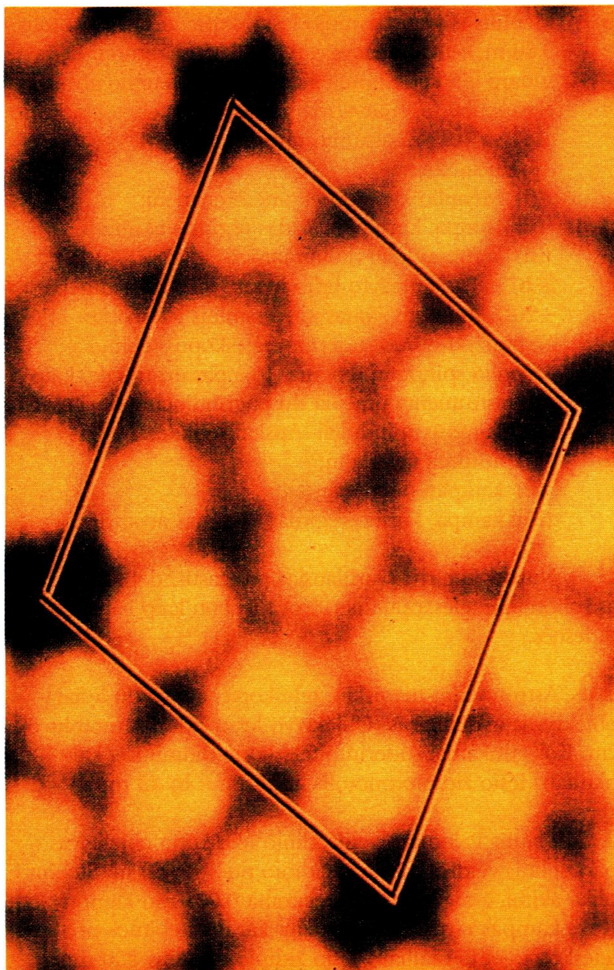
19.56 paveiksle pateikti atvaizdai yra gauti skaitančiuoju tuneliniu mikroskopu. Juose ant stebimų objektų paviršių galima įžiūrėti net atskirus atomus. Tokie atvaizdai gaunami panaudojant gan keistą elektronų savybę: elektronas elgiasi taip, tarsi jis tuo pat metu būtų keliose vietose. Kvantinė teorija teigia, kad elektronas gali būti bet kurioje vietoje, kurią apibrėžia jo banginė funkcija (žr. 14 sk.).

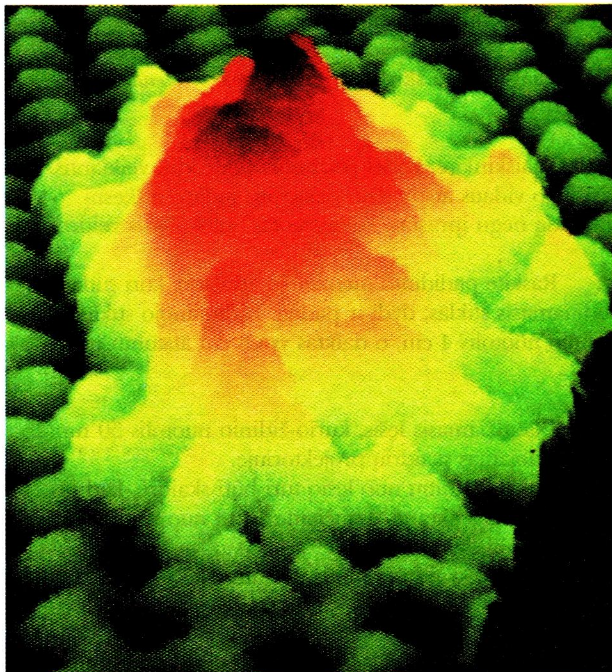
Skaitančiame tuneliniame mikroskope (STM) labai plona adata slenka virš daikto paviršiaus. Kad nesuardytų paviršiaus, adata turi jo neliesti, o judėti taip, kad atstumas tarp adatos ir paviršiaus nesikeistų. (Panašiai kaip grotuvo plokštelių grioveliu – juo slenkanti adata užčiuopia griovelyje įbrėžtus nelygumus.) Tačiau net ir nesiliesdama adata gali „užčiuopti" paviršiuje esančius elektronus net ir tuo atveju, kai pagal įprastus fizikos dėsnius elektronas turi per mažai energijos ir negali atitrūkti nuo paviršiaus. Dėl to apie tokius elektronus sakoma, kad jie **tuneliuoja** pro potencialinį energetinį barjerą.

Kuo daugiau elektronų yra tam tikroje paviršiaus vietoje – ties labiausiai išsikišusių atomų kraštu, – tuo daugiau elektronų tuneliuoja. Tuneliavusių elektronų sukurta srovė ir panaudojama kompiuteriniam atvaizdui sudaryti. Tokiame atvaizde matomi atomo dydžio objektai. Visa tai pavyksta padaryti prie adatos prijungus vos keleto voltų teigiamą įtampą.

STM yra pranašesnis už elektroninį mikroskopą: su juo galima stebėti paviršius, kuriuos gali pažeisti juos apšaudantys didelės energijos elektronai; be to, matuojant STM nereikia vakuumo.

■ Žr. 18 ir 19 klausimus.





19.55 pav. **Skaitančiuoju tuneliniu mikroskopu galima matyti atskirus atomus ant tiriamo paviršiaus**

Viršuje: 3 atominių sluoksnių aukščio aukso atomų salelė (pereinamos iš geltonos į raudoną spalvos) ant grafitinio padėklo (žalia spalva)

Kairėje: 45 milijonus kartų padidintas silicio kristalo paviršius. Kiekviena oranžinės spalvos dėmė atitinka vieną silicio atomą. Blankios spalvos išplitimai tarp kai kurių atomų atitinka tuos atomus rišančius elektronus. Lygiagretainiu apibrėžtas pasikartojantis kristalinės struktūros elementas

SANTRAUKA

Išnagrinėję šiame skyriuje pateiktą medžiagą jūs turėtume:

- Suprasti atvaizdų ir jų sudarymo svarbą šiuolaikiniame gyvenime.
- Suprasti, kaip lęšiais sudaromi atvaizdai, ir mokėti atskirti tikruosius atvaizdus nuo menamųjų.
- Suprasti lęšio laužiamosios gebos, išreikštos dioptrijomis ($1/f$ [m]), prasmę.
- Mokėti rasti vieno lęšio arba veidrodžio sudaryto atvaizdo dydį ir padėtį dviem būdais: grafiškai – braižant pagalbinius spindulius, ir matematiškai – taikant plonojo lęšio formulę:

$$\frac{1}{u}+\frac{1}{v}=\frac{1}{f} \text{ ir } M=\frac{v}{u}$$

- Suprasti, kas yra skyra, ir mokėti ją apskaičiuoti pagal Relėjaus (*Raileigh*) dėsnį

$$\theta = \lambda/d.$$

- Suprasti pagrindinių optinių prietaisų (didinamojo stiklo, projekcinio aparato, fotoaparatų, veidrodinio ir lęšinio astronominių teleskopų, sudėtingo mikroskopo), taip pat akies veikimo principus, jų svarbiausius trūkumus ir tų trūkumų šalinimo būdus.
- Mokėti taikyti teleskopo ir mikroskopo didinimo formules:

$$M_t=\frac{f_{ob}}{f_{ok}}; \quad M_m=\frac{25L}{f_{ob}f_{ok}}$$

- Žinoti, kaip atvaizdai užfiksuojami fotojuostose ir kituose atvaizdus įrašančiuose įtaisuose.
- Suprasti, kokiais fizikos principais pagrįstas modernių vaizdavimo sistemų, tokių kaip surištųjų krūvių elementas, vaizduoklio ekranas, echoskopas, branduolių magnetinio rezonanso spektrometras, elektroninis mikroskopas ir skaitantysis tunelinis mikroskopas, veikimas.

KLAUSIMAI

1 Ar norint veidrodyje pamatyti savo kūną visu ūgiu reikia naudoti plokščiąjį veidrodį, kurio aukštis lygus ūgiui? Atsakymą iliustruokite spindulių schema.

2 Paaiškinkite skirtumą tarp *tikrojo* ir *menamojo* atvaizdo.

3 Paaiškinkite, kodėl prizminis veidrodis, veikiantis visiškojo vidaus atspindžio principu, sudaro aiškesnį atvaizdą negu įprastas, „sidabruotas“ plokščiasis veidrodis.

4 Raskite padidinto menamojo atvaizdo, kurį sudaro didinamasis stiklas, dydį ir padėtį. Didinamojo stiklo židinio nuotolis 4 cm, o daiktas yra 3 cm atstumu nuo lęšio.

5 Glaudžiamasis lęšis, kurio židinio nuotolis 50 mm, yra naudojamas skaidrių projektoriuje.

a) Kokiu atstumu nuo lęšio turi būti skaidrė, kad jos atvaizdas ekrane, esančiame 12 m nuo veidrodžio, būtų aiškus?

b) atvaizdo skaidrėje plotis 36 mm. Koks atvaizdo plotis ekrane?

6 Kodėl veidrodžiai, skirti veido dalims padidinti, yra įgaubtieji?

7 Kodėl automobilių galinio vaizdo veidrodžiai yra iškilieji?

8

a) Paaiškinkite, kas yra glaudžiamojo lęšio *pagrindinis židinys* ir *židinio nuotolis*. Kiekvienu atveju pažymėję pagrindinio židinio padėtį parodykite, kad glaudžiamasis lęšis gali sukurti **(i)** tikro daikto neapverstą padidintą atvaizdą ir **(ii)** aiškiai sufokusuotą Mėnulio atvaizdą ekrane.

b) Mėnulis iš glaudžiamojo lęšio, kurio židinio nuotolis 0,80 m, centro matomas $9{,}2\times10^{-3}$ rad kampu. Lęšis sudaro aiškiai matomą sufokusuotą Mėnulio atvaizdą ekrane, be to, šį atvaizdą gerai įžiūri stebėtojas, kurio akis yra 0,25 m atstumu nuo ekrano.
Apskaičiuokite:
(i) Mėnulio atvaizdo ekrane skersmenį;
(ii) kampą, kuriuo atvaizdas regimas akimi;
(iii) kampinį lęšio didinimą.

c) Iš **b)** dalyje aprašyto lęšio ir kito lęšio, kurio geba +20D, sumontuojamas astronominis teleskopas. Nubraižykite šiuo suderintu teleskopu stebimo Mėnulio spindulių schemą. Joje pavaizduokite, kaip pro instrumentą praeina **du** pagrindinei optinei ašiai nelygiagretūs spinduliai. Apskaičiuokite:
(i) atstumą tarp lęšių;
(ii) kampinį didinimą;
(iii) kampą, kuriuo regimas stebimas atvaizdas.

9 Nurodykite dvi svarbiausias priežastis, dėl kurių astronominių teleskopų apertūros turi būti kaip galima didesnės.

10 Astronominį meniskinį teleskopą sudaro du lęšiai – objektyvas ir okuliaras. Objektyvo lęšio židinio nuotolis 60 cm. Koks tinkamai suderinto teleskopo didinimas, kai okuliaro lęšio židinio nuotolis **a)** 25 mm; **b)** 45 mm?

11 Maunt Palomaro veidrodinio teleskopo objektyvas – parabolinis veidrodis, kurio židinio nuotolis 80 m. Stebint plika akimi, žvaigždžių pora matoma 0,001 rad kampu. Koks kampas tarp šių žvaigždžių, kai jos stebimos pro teleskopą, jei jo okuliaro lęšio židinio nuotolis 250 mm?

12 Kodėl astronominių teleskopų objektyvai dažniausiai yra kreivieji veidrodžiai, o ne lęšiai?

13 Kodėl žiūronų ilgis yra mažesnis už tiek pat kartų didinančio teleskopo ilgį?

14 Šiame skyriuje pateikta informacija apie surištųjų krūvių elementus jau tikriausiai yra pasenusi. Pasinaudokite kitais informacijos šaltiniais ir raskite atsakymus į tokius klausimus:

a) Kokie mėgėjiškoje vaizdo kameroje naudojamo surištųjų krūvių įtaiso fizikiniai matmenys? Kiek elementų yra šiame įtaise?

b) Kur dar naudojami SKĮ: **(i)** pramonėje, **(ii)** moksle?

15 Kas lemia televizoriaus ekrane regimo atvaizdo skyrą: atvaizdui sukurti naudojamų elektronų bangos ilgis ar ekrano elemento matmenys? Atsakymą kuo išsamiau pagrįskite skaitiniais duomenimis.

16 Kodėl spalvotajai televizijai pakanka tik trijų spalvų – raudonos, žalios, mėlynos?

17 Kodėl medicininei diagnostikai labiau priimtini tokie kūno atvaizdavimo metodai kaip branduolių magnetinio rezonanso spektroskopija ir echoskopija, o ne rentgeno spindulių metodas?

18 Parašykite trumpą (500 žodžių) iliustruotą rašinį žurnalui, kuriame nefizikui išaiškinkite fizikos svarbą kasdieniniame gyvenime sudarant norimus atvaizdus.

19 Remiantis bangų teorija aiškinami atvaizdų sudarymo principai, o daleline (korpuskuline) teorija – kaip atvaizdai juntami arba registruojami. Ar šis teiginys teisingas? Atsakymą pagrįskite nagrinėdami kokio nors optinio prietaiso veikimą.

Užduotis

ŠVIESOLAIDŽIAI

Visi tolimų nuotolių telefono pokalbiai šiuo metu daugelyje pasaulio šalių perduodami šviesolaidžiais (optinėmis skaidulomis), o ne variniais laidais. Spinduliuotę naudojant kaip siunčiamąjį signalą, kurio dažnis apie 10^{14} Hz, šviesolaidžiu vienu metu galima perduoti daugybę pokalbių ir duomenų. Šviesolaidžiu pasiekiamas toks didelis perdavimo greitis ir kokybė, jog juo galima persiųsti ir TV filmus. Apie tai plačiau rasite 21 skyriuje.

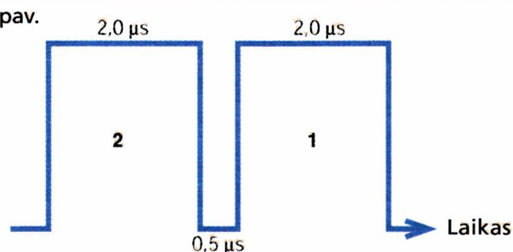
Priešingai nei varinėse perdavimo sistemose, šviesolaidžiuose nepasireiškia signalą trikdantys elektriniai reiškiniai, tokie kaip varža. Šviesolaidžiai lengvesni ir plonesni, todėl to paties storio kabelyje gali tilpti daug daugiau optinių skaidulų nei varinių laidų.

Tačiau naudojant šviesolaidžius susiduriama su tokiomis dviem pagrindinėmis problemomis: signalo slopimas ir signalo, atitinkančio tą pačią informaciją, persiklojimas.

Slopimas

Signalas su skaitmeniškai užkoduota informacija (19.U1 pav.) patenka į šviesolaidį kaip infraraudonosios šviesos pluoštelis. Dalį šios spinduliuotės išsklaido šviesolaidžio molekulės, šiek tiek energijos prarandama dėl įvairių sugerties procesų. 1 km kabelyje šviesos energija sumažėja maždaug 2,0 decibelais.

19.U1 pav.



Signalo persiklojimas

Paprastos optinės skaidulos sandara pateikta 19.U2 a) paveiksle. Ją sudaro centrinė stiklinė šerdis, kurios skersmuo apie 60 μm. Šerdį supa apsauginis 32,5 μm storio apsauginis stiklo sluoksnis, kurio lūžio rodiklis mažesnis negu šerdies. Tokie šviesolaidžiai vadinami stačiakampio profilio skaidulomis.

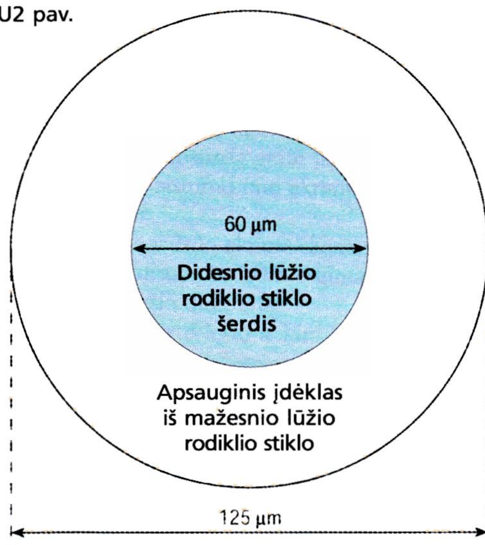
Kadangi apsauginio sluoksnio lūžio rodiklis mažesnis, tai ties šio sluoksnio ir šerdies sandūra gali vykti visiškas vidaus atspindys. Jeigu signalo spinduliuotė patenka į šerdį tam tikru kampu, tai ji sklinda šerdimi atsispindėdama nuo sienelių net ir tuo atveju, kai šviesolaidis sulenkiamas. Tokios konstrukcijos šviesolaidžiuose signalas gali sklisti įvairiomis trajektorijomis, 19.U3 paveiksle pavaizduoti tik du keliai.

Tarkime, kad 1 trajektorija sklinda vienas skaitmeninio signalo impulsas, o 2 trajektorija – sekantis signalo impulsas. Kadangi 1 spindulio trajektorija ilgesnė negu 2-ojo, tai antrasis impulsas pasiveja pirmąjį ir šviesolaidžio gale esančiame registruojančiame įrenginyje šie impulsai persikloja. Dėl to prarandama signale užkoduota informacija.

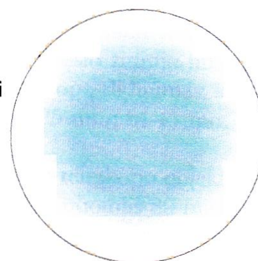
Kitokios konstrukcijos šviesolaidžių gamyboje naudojamas stiklas, kurio lūžio rodiklis mažėja ne staiga, o tolydžiai nuo šerdies centro link kraštų (19.U2b) pav.). Tokios optinės skaidulos vadinamos gradientinio profilio šviesolaidžiais. Juose taip pat vyksta visiškas vidaus atspindys, tik, priešingai nei stačiakampio profilio šviesolaidžiuose, šviesos spinduliai mažesnio lūžio rodiklio srityje sklinda greičiau. Dėl to lūžio rodiklio kitimas parenkamas toks, kad visomis įmanomomis trajektorijomis sklindančių spindulių sugaištas laikas būtų vienodas.

Tačiau stačiakampio profilio lūžio rodiklio šviesolaidžiai yra palyginti brangūs, todėl pastaruoju metu gaminamos 19.U2a) paveiksle pavaizduoto tipo optinės skaidulos: jos padaromos tokios plonos, kad sklindantys signalai neiškraipomi.

19.U2 pav.

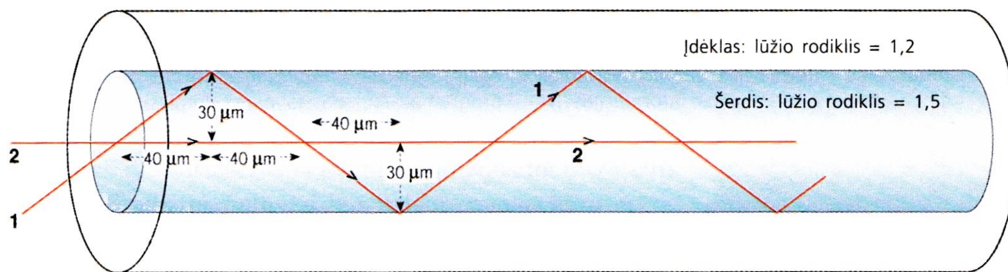


a) staiga kintančio lūžio rodiklio optinė skaidula



Lūžio rodiklis tolydžiai mažėja nuo centro link skaidulos kraštų

b) tolydaus lūžio rodiklio optinė skaidula



19.U3 pav. Šviesolaidžiu sklindančios spinduliuotės trajektorijos

Duomenys

Slopimą A, išreikštą decibelais [dB], su galia [W] sieja toks ryšys:

$$A = -10\log_{10}\frac{P_o}{P_i}$$

kur P_0 yra išėjimo galia, o P_1 – įėjimo galia.

Šviesos greitis vakuume $3{,}0 \times 10^8$ m · s^{-1}.

$$\text{Lūžio rodiklis} = \frac{\text{šviesos greitis vakuume}}{\text{šviesos greitis terpėje}}$$

1 Lazeris siunčia 10 mW galios signalą į šviesolaidinį kabelį, kurio slopinimas 2 dB / km.

a) Koks 40 km ilgio kabelio slopinimas?

b) Įrodykite, kad tokį nuotolį nusklidusio signalo galia išėjime lygi 10^{-10} W.

c) Elektrinėse grandinėse visada kyla elektromagnetiniai triukšmai. Nagrinėjamoje šviesolaidinėje ryšio sistemoje jų galia $1{,}0\times10^{-18}$ W. Norint šviesolaidžiu atsklidusį signalą išskirti iš būdingų triukšmų neprarandant informacijos, signalo ir triukšmo galių santykis turi būti ne mažesnis kaip 20 dB. Apskaičiuokite, kokios galios signalą vis dar galima priimti.

d) Siekiant gauti kuo didesnį signalo ir triukšmo galių santykį, signalas paprastai stiprinamas. Kokio didžiausio ilgio kabelį galima nutiesti tarp lazerio ir imtuvo nenaudojant tarp jų stiprintuvo?

2 Šviesolaidžiu, pavaizduotu 19.U2 paveiksle, perduodamo signalo imtuvas yra 1 km atstumu nuo lazerio.

a) Kokį atstumą iš tikrųjų nusklinda pirmasis impulsas (19.U3 pav.), kol pasiekia lazerį?

b) Kokį atstumą nusklis antrasis impulsas?

c) Apskaičiuokite abiejų impulsų sklidimo trukmes.

3

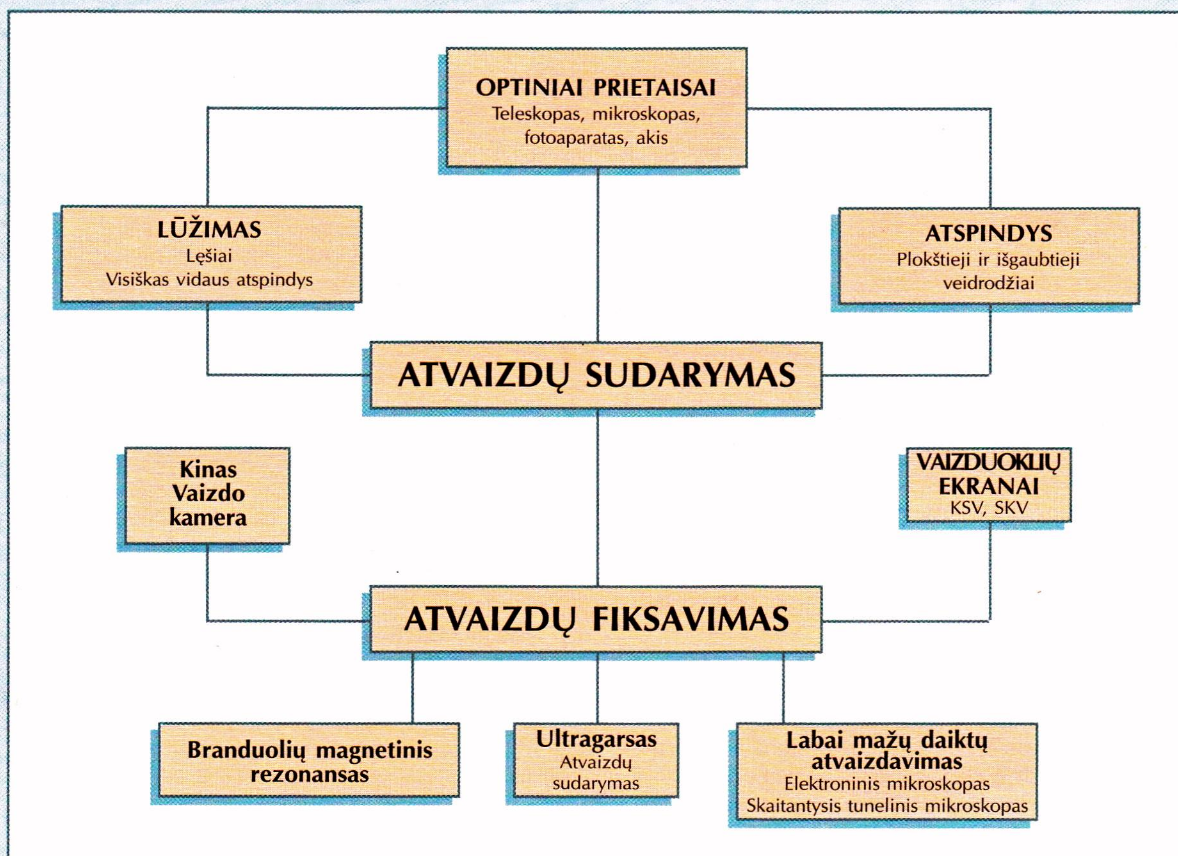
a) Signalo duomenys užkoduojami stačiakampiais 2,0 μs impulsais, tarp kurių intervalas 0,5 μs (19.U1 pav.). Nubraižykite dviejų impulsų signalą šviesolaidžio su staigiu lūžio rodiklio pokyčiu pradžioje ir pabaigoje. Pakomentuokite gautą rezultatą.

b) Tarkime, du tokie patys impulsai paleidžiami tolydinio lūžio rodiklio šviesolaidžiu. Nubrėžkite galimas spindulių trajektorijas ir pažymėkite, išilgai kurios trajektorijos spinduliuotė sklinda **(i)** greičiausiai ir **(ii)** lėčiausiai.

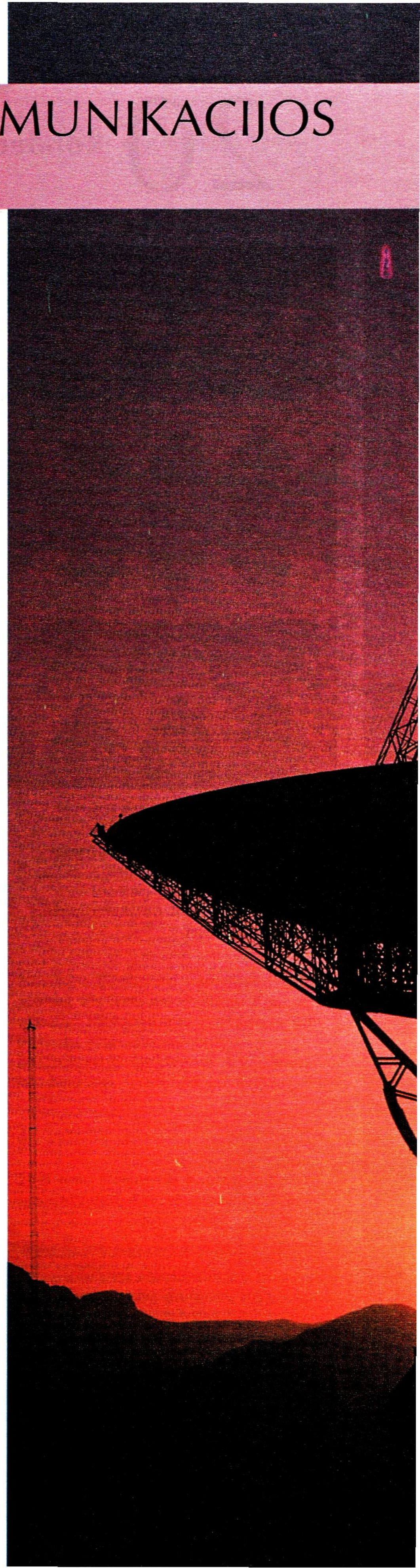
ATVAIZDŲ SUDARYMAS

Žemiau pateiktoje skyriaus schemoje pagrindinės skyriuje aptartos sąvokos susietos su informacijos sritimis. Pavadinimų šrifto dydis atitinka sąvokos aprėpiamos informacijos lygį ir išskiria pagrindines sąvokas. Schemoje taip pat matyti, kaip pagrindinės sąvokos yra susijusios su kitais skyriais.

Naudodamiesi šia schema galite įsiminti, kokią pagrindinę informaciją turėtumėte sukaupti pagal mokymosi programą. Taip pat ja naudodamiesi galite patikrinti savo žinias ir lengvai rasti klausimus, kuriuos jums gali tekti panagrinėti.



FIZIKA VALDYMO IR KOMUNIKACIJOS PROCESUOSE



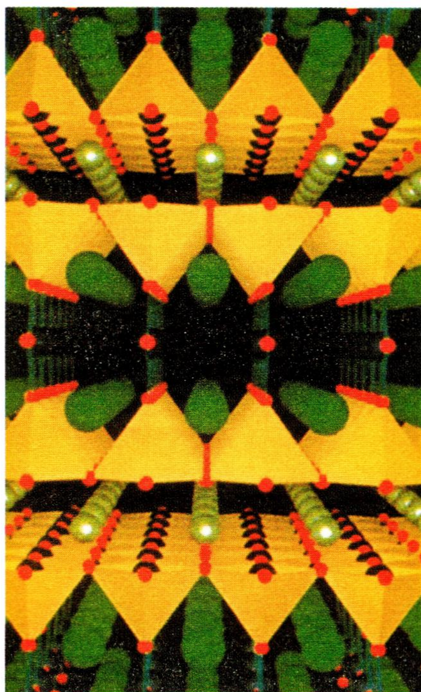
Per pastaruosius dešimtmečius ryšių technologijos tobulėjo taip sparčiai, jog XX amžius pelnytai bus prisimenamas kaip komunikacijos amžius. Modernioji komunikacija grindžiama ne tik elektromagnetinėmis bangomis, kuriomis perduodama informacija, bet ir naujausiais metodais bei medžiagomis, kurios naudojamos informacijai valdyti, saugoti, perduoti ir priimti.

Šią fizikos kurso dalį pradėsime nuo medžiagų savybių, daugiausiai dėmesio skirsime elektrinėms ir magnetinėms savybėms, kurias tiria tankios (didelės koncentracijos) medžiagos mokslas, dar kitaip vadinamas kietojo kūno fizika. Mat naudingosios laidininkų, dielektrikų ir puslaidininkių savybės labai priklauso nuo medžiagos struktūros, kai atomai yra arti vienas kito, kitais žodžiais tariant, kai atomai yra „koncentruoti“.

Kitas medžiagų savybes nulemiantis veiksnys yra būdas, kuriuo atomai pasidalija elektronus. Kai kurios iš šių medžiagų pasižymi magnetinėmis savybėmis: jos gali būti įmagnetintos trumpam ar kiek norima ilgam laikui, todėl naudojamos duomenis išsaugantiems įrenginiams gaminti.

Taip pat sužinosite, kokiais būdais ryšių sistemose informacija yra užkoduojama ir perduodama dideliais nuotoliais, susipažinsite su kodavimui ir perdavimui skirtais elektroniniais prietaisais.

20 Kondensuotosios medžiagos



Kompiuteriu sukurtas aukštos temperatūros superlaidininkio $YBa_2Cu_3O_{6,5}$ atvaizdas. Itrio atomai pažymėti pilka spalva, bario – žalia, deguonies – raudona; geltoni daugiakampiai žymi pasikartojančias kristalo struktūras

V. Šoklis (*William Schockley*) 1948 metais užpatentavo naują išradimą – tranzistorių. Jis pasinaudojo jau amžiaus pradžioje pasižymėjusia kvantinės mechanikos teorija ir tuo metu gerokai pažengusiu medžiagų pažinimu ir jų savybių taikymu. Po dešimties metų, atsiradus tranzistoriniams radijo imtuvams ir pirmiesiems kompiuteriams, prasidėjo elektroninė revoliucija.

Sparti teorijos ir technologijos plėtra įgalino sumažinti silicio, germanio, o pastaruoju metu – galio arsenido pagrindu sukonstruotus prietaisus iki miniatiūrinio dydžio. Kai kuriuose prietaisuose laidininkai yra vos keleto atomų sluoksnių storio, todėl galima sakyti, kad srovė teka dviejų matmenų paviršiumi – plokštuma. Net nepastebime, kaip elektroninė įranga su tokiais miniatiūriniais elementais įžengia į mūsų namus ir darbo vietas. Istorijoje nedažnai atsitinka taip, kad vienas vienintelis technologijos išradimas sukeltų tokius stulbinančius efektus.

Ar galima numatyti, kokia kita naujovė taip stipriai paveiks technikos raidą ateityje? Tai galėtų būti superlaidininkų, veikiančių kambario temperatūroje, sukūrimas. Naudojant tokius laidininkus (bent jau teoriškai) elektros energiją būtų galima perduoti bet kokiu nuotoliu visiškai be nuostolių.

Taigi nuo fizikos mokslo pasiekimų ir toliau priklausys mūsų pasaulio raida, o ypač svarbi sritis dabar yra naujų medžiagų ir jų savybių tyrimai.

1 ĮVADAS: ATOMAI IR JŲ IŠORINIŲ PASLUOKSNIŲ ELEKTRONAI

Šis skyrius pavadintas „Kondensuotosios medžiagos", bet lygiai taip pat jis galėtų būti pavadintas „Kietojo kūno fizika". Tai kodėl taip nepavadinome? Iš dalies dėl to, kad „kondensuotoji medžiaga" yra madingas pavadinimas. Bet dar yra svarbiau tai, jog žodis „kietasis" nevisiškai atitinka faktą, jog visose medžiagose atomai ir elektronai nuolatos juda, o žodis „fizika" nuslepia chemijos svarbą medžiagų technologijos moksle.

Visi atomai turi branduolį, sudarytą iš neutronų ir protonų, o apie branduolį – tam tikrą skaičių elektronų, kurių, beje, yra tiek pat kiek protonų. Laikantis paprasto atomo modelio teigiama, kad elektronai skrieja aplink branduolį keliomis orbitomis, panašiai kaip planetos apie Saulę. Tačiau remiantis tokiu modeliu neįmanoma sukurti teorijos, kuri leistų nustatyti tikslias tam tikros energijos elektronų judėjimo trajektorijas. 17 skyriuje paaiškinta, kad atomo sandarą ir savybes tiksliausiai aprašo tik kvantinė mechanika.

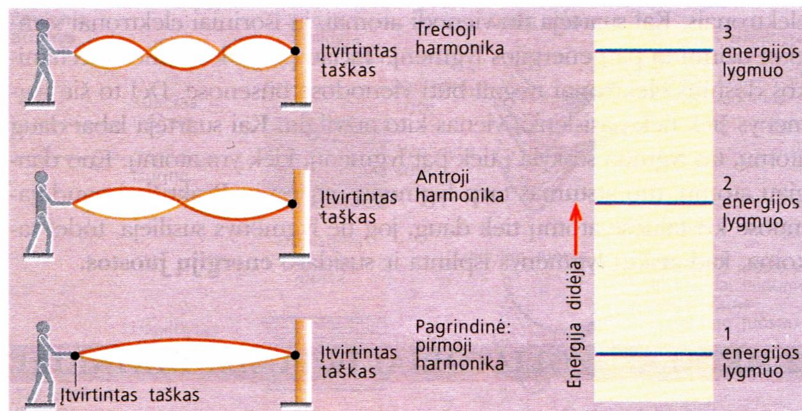
Kvantinės mechanikos požiūriu elektronas yra bangos, sklindančios apskritimu apribotame plote, arba dar tiksliau – kaip trimatės bangos, užpil-

✓

Skirtingo dažnio gitaros stygos vibracijoms sužadinti reikalingas nevienodas energijos kiekis.

?

A 4 m ilgio virvutėje sukuriamos stovinčiosios bangos. Raskite pirmųjų keturių harmonikų bangų ilgius. Įrodykite, kad jie lygūs 8/*n* metrams, kur *n* – sveikasis skaičius.



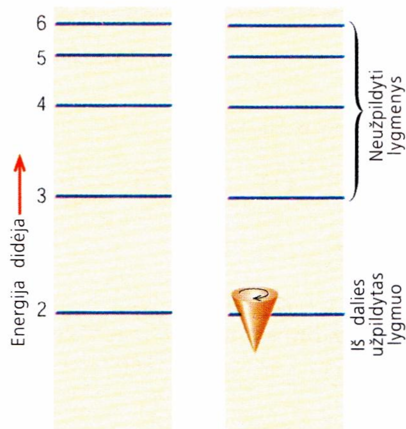
20.1 pav. **Stovinčioji banga virvutėje. Kiekvieną svyravimų seką atitinka tam tikra energija, kuri gali būti pavaizduota kaip energijos lygmuo**

dančios artimąją sritį apie branduolį. Panašiai kaip ranka timpčiodami prie sienos pritvirtintą virvutę galime sukelti stovinčiąsias bangas (žr. 20.1 pav.), taip ir elektroną atitinkančios bangos yra tokio bangos ilgio, kad aplink branduolį esančiame uždarame tūryje susidaro stovinčiosios bangos.

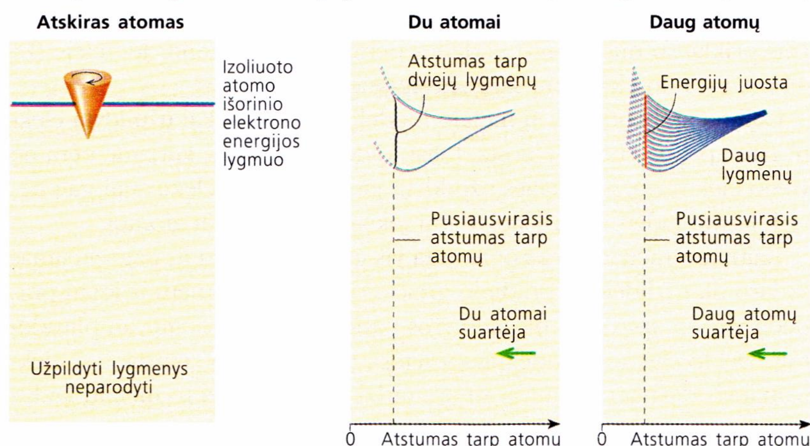
Tame tūryje galima sukurti daug skirtingų svyravimų sekų, tačiau kiekvienai sekai sužadinti reikalingas vis kitoks energijos kiekis. Skirtingas elektroną atitinkančios bangos svyravimų sekas galima susieti su energijos lygmenimis. (Labai panašiai skirtingas energijas priskiriame ir planetoms, skirtingų spindulių orbitomis besisukančioms apie centrinį kūną – Saulę.)

Atomo savybes (išskyrus branduolio sąlygojamas) nulemia energijos lygmenų, kuriuos gali užimti elektronai-bangos, rinkinys (20.2 pav.). Kiek lygmenų bus užpildyta, priklauso nuo atomo numerio periodinėje elementų lentelėje. Jeigu atomas yra pagrindinėje būsenoje, t. y., jeigu jis yra nesužadintas, tai elektronai užpildo nuo paties žemiausio lygmens kaskart vis aukštesnius lygmenis. Žemiausias lygmuo apytiksliai atitinka elektroną, kurio judėjimo trajektorija yra arčiausiai branduolio. (Jeigu grįžtume prie modelio, pagal kurį elektronas yra dalelė, tai pamatytume, jog jis juda aplink branduolį labai greitai, taip greitai, kad neįmanoma tiksliai nustatyti, kur yra elektronas kuriuo nors momentu, tačiau galime teigti, kad vidutiniškai vieni jų yra arčiau branduolio už kitus.) Kiekvieną lygmenį gali užimti tik du elektronai, tačiau net ir šie elektronai kuria nors savybe turi skirtis. Pasirodo, tame pačiame energijos lygmenyje esantys elektronai sukasi į priešingas puses.

Kai atomai suartėja ir sudaro sudėtingesnius junginius, tai jų išoriniai – **valentiniai** – elektronai sąveikauja. Kaip matyti 20.3 paveiksle, virš paskutinio užpildytojo lygmens yra tik neužpildyti, o žemiau jo – visi užpildytieji lygmenys. Vidiniai elektronai yra arčiau branduolio, todėl stipriau su juo surišti ir paprastai beveik nesąveikauja su kitų atomų



20.2 pav. **Elektrono energijos lygmenys atome. Elektronas atvaizduotas vilkeliu. Kiekviename lygmenyje gali būti du į priešingas puses besisukantys elektronai, t.y. vienas neapverstas ir vienas apverstas vilkelis**



20.3 pav. **Elektrono energijos juostų susidarymas, kai atomai suartėja**

elektronais. Kai suartėja du vienodi atomai, jų išoriniai elektronai stengiasi užimti tą patį energijos lygmenį. Tačiau pagal kvantinės mechanikos dėsnius elektronai negali būti vienodose būsenose. Dėl to šie lygmenys šiek tiek pasislenka vienas kito atžvilgiu. Kai suartėja labai daug atomų, tas lygmuo suskyla į tiek pat lygmenų, kiek yra atomų. Kuo daugiau atomų, tuo atstumas tarp lygmenų mažesnis. Praktiškai naudojamuose kristaluose atomų tiek daug, jog tie lygmenys susilieja, todėl sakoma, kad atskiri lygmenys išplinta ir susidaro **energijų juostos.**

?

B Glaustai paaiškinkite atomų, esančių skirtinguose periodinės elementų lentelės stulpeliuose, elektroninius skirtumus.

C Tarkime, jūsų kambarį apraizgiusi elektrinė grandinė, į kurią įjungta ir lemputė. Įvertinkite, kiek maždaug užtruks elektronas, kol apkeliaus grandinę aplink kambarį, kai įjungsite lemputę. Kokį maždaug nuotolį įveiks elektronas per šį laiką? Kodėl tad šviesa kambaryje įsižiebia akimirksniu?

Žr. 1 klausimą.

2 METALAI, IZOLIATORIAI IR PUSLAIDININKIAI

Metalų laidumas

Metalai gerai praleidžia elektros srovę, nes išoriniai, silpnai su branduoliu surišti elektronai gali beveik laisvai judėti jonų gardelėje (20.4 pav.). Jonai – tai tie patys atomai, tik be išorinio elektrono; išsilaisvinę elektronai jau nebepriklauso jokiam konkrečiam atomui. Yra ir tokių atomų, kurie išoriniame pasluoksnyje turi daugiau nei vieną elektroną, pavyzdžiui, periodinės elementų lentelės II grupės atomų išoriniame pasluoksnyje yra du elektronai.

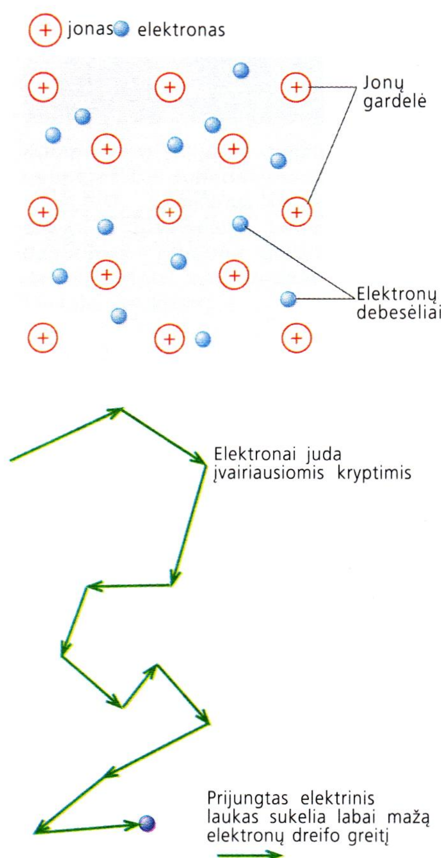
Elektronai juda labai greitai: jų greitis yra apie 10^5 m·s^{-1}. Jų judėjimo kristale kryptys kinta chaotiškai, todėl vidutiniškai elektronai nepasislenka jokia kryptimi. Tačiau prie laidininko galų prijungus elektrovaros šaltinį, elektronai įgyja papildomą greičio dedamąją, vadinamą **dreifo greičiu**, nukreiptą išilgai laidininko, ir elektronai pamažu ima judėti grandine, sukeldami elektros srovę. Sakome „pamažu“, nes dreifo greitis yra maždaug apie 10^{-5} m·s^{-1}. Dreifo greitis gali kisti plačiose ribose priklausomai nuo laidininko skerspjūvio ir tekančios srovės stiprio.

Energijų juostų modelis gerai paaiškina, kodėl metalų laidumas didelis. Srovę sukeliantys elektronai yra vienoje ir toje pačioje energijų juostoje. Tačiau kaip žmonės minioje gali judėti tik ten, kur yra laisvos vietos, taip ir elektronai energijų juostoje gali judėti tik ten, kur dar yra neužimtų *energijos* lygmenų. Jei užpildytos visos būsenos, tai elektrono energija pakisti negali, ir tokia medžiaga elektros srovės nepraleidžia.

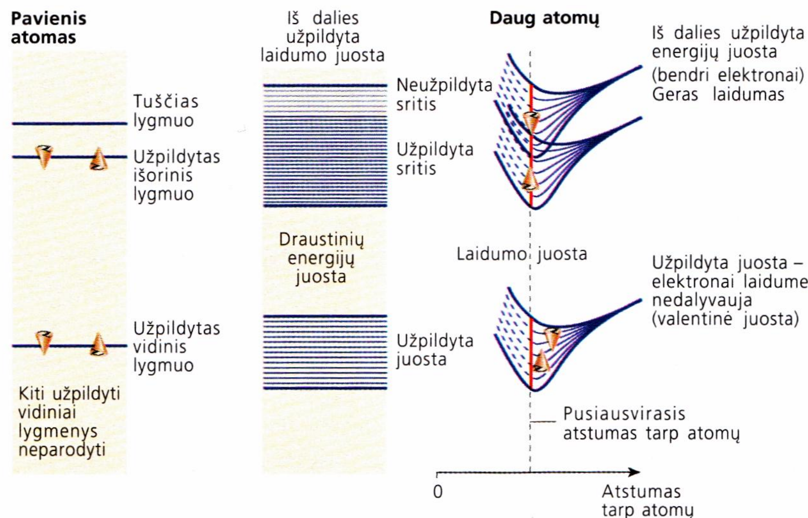
Taigi, kad galėtų laisvai judėti elektrine grandine, elektronams reikia laisvos vietos ne tik pačioje medžiagoje, bet ir energijų juostoje. Dėl to labai gero laidininko energijų juostoje turi būti daug elektronais užpildytų būsenų ir daug neužpildytų būsenų. Būtent taip ir atsitinka, kai izoliuotų atomų *užpildytieji* ir *neužpildytieji* lygmenys išplinta ir persikloja, kai atomai suartėja (20.5 pav.). Suprantama, žemiau šių persiklojusių juostų yra ir kitos visiškai užpildytos juostos. Tokių juostų skaičius priklauso nuo atomo padėties periodinėje elementų lentelėje (žr. 45 p.), t.y. nuo elektronų skaičiaus atome.

Galima apibendrinti: šį metalo modelį sudaro visiškai užpildyta elektronais apatinė energijų juosta, toliau didelis intervalas, kuriame nėra nė vieno elektrono, ir iš dalies užpildyta juosta, kurioje elektronai gali beveik laisvai judėti, nepriklausydami jokiam konkrečiam atomui.

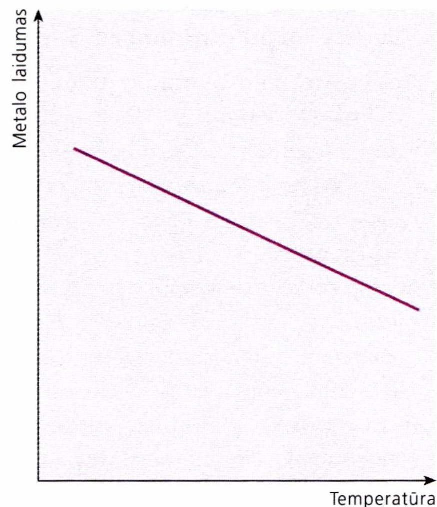
Kaitinant metalą, elektronai juda vis greičiau, tačiau jų pagreitėjimas sudaro tik nedidelę jų pradinio greičio dalį. Tuo pat metu ir jonai pradeda virpėti apie savo pusiausvyros padėtis vis didesnėmis amplitudėmis. Dėl to elektronų judėjimas sulėtėja, nes tarp jonų „nardantys“ elektronai vis dažniau susiduria su jais (arba gardele). Dėl to metalų laidumas kylant temperatūrai mažėja (20.6 pav.).



20.4 pav. **Metalas sudarytas iš jonų gardelės ir tarp jų pasklidusių laisvųjų elektronų. Prie metalo prijungus elektrovarą, elektronai lėtai dreifuoja elektrine grandine ir sukelia elektros srovę**



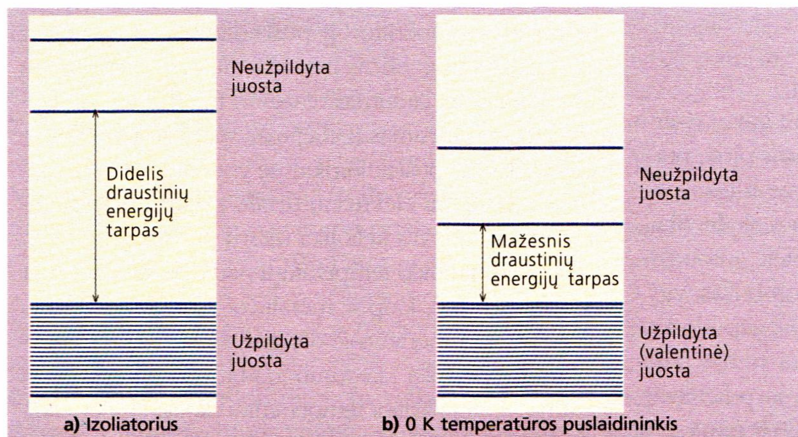
20.5 pav. **Kai išplitusios energijų juostos persikloja, jos gali būti nevisiškai užpildytos elektronais**



20.6 pav. **Metalų laidumo priklausomybė nuo temperatūros**

Izoliatoriaus laidumas

Izoliatoriaus energijų juostos užpildytos kiek kitaip negu metalų. Izoliatorių apatinė juosta *visiškai* užpildyta elektronais, virš jos yra platus energijų tarpas, kuriame nėra elektronų, po to yra dar viena juosta, kuri visiškai tuščia. Elektronai negali judėti užpildytoje juostoje, nes joje nėra nė vienos laisvos energijos būsenos, į kurią jie galėtų peršokti, o į tuščią viršuje esančią juostą elektronai peršokti negali, nes neturi pakankamai energijos. Dėl to izoliatorių elektrinis laidumas yra labai mažas. Net ir pakaitinus dielektriką elektronai nesužadinami tiek, kad galėtų peršokti į viršutinę juostą.



20.7 pav. **Izoliatoriaus a) ir puslaidininkio b) juostinė struktūra 0 K temperatūroje**

Grynojo puslaidininkio laidumas

Puslaidininkių dėka per pastaruosius dešimtmečius buvo sukurta labai daug įvairiose srityse naudojamų elektroninių prietaisų. Tikriausiai pats naudingiausias ir geriausiai žinomas prietaisas, kurio pagrindiniai elementai pagaminti iš puslaidininkių, yra kompiuteris. Mažus kompiuterių matmenis ir jų veikimo spartą sąlygoja tai, kad galima pagaminti labai mažus puslaidininkinius prietaisus, taigi elektronai juose turi nueiti nedidelius atstumus. Jau ir pavadinimas rodo, kad puslaidininkiai pasižymi mažesniu elektriniu laidumu negu metalai, tačiau didesniu negu izoliatoriai, mat puslaidininkiuose laisvųjų krūvininkų yra mažiau negu metaluose.

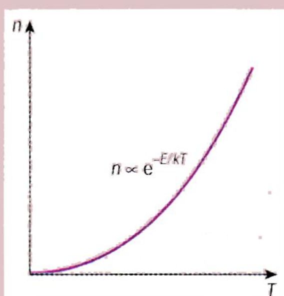
Savasis puslaidininkių laidumas

Atomų vidutinę šiluminio judėjimo energiją galima išreikšti temperatūros T (kelvinais) ir Bolcmano konstantos k sandauga. Kambario temperatūroje ši sandauga yra gerokai mažesnė už tipinių puslaidininkių draustinių energijų tarpą E, kuris dar kitaip vadinamas draustinių energijų juosta. Pasirodo, kad tikimybė, jog elektronas peršoks per draustinę juostą, kurios plotis E, yra proporcinga $\exp(-E/kT)$.

Dabar tarkime, kad sistema sudaryta iš N atomų, kurių kiekvienas turi po elektroną, galintį išsilaisvinti, t.y. peršokti į laidumo juostą. Tada išsilaisvinusių elektronų skaičių galima rasti pagal tokią formulę:

$$n = N\, e^{-E/kT}$$

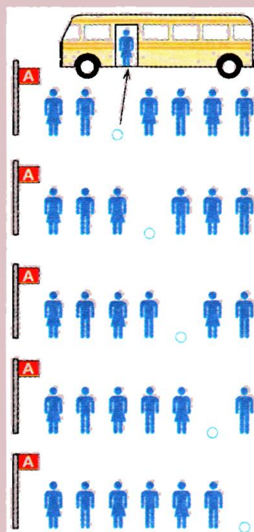
Elektronų skaičius laidumo juostoje n labai greitai didėja kylant temperatūrai T (20.8 pav.). Būtent šie elektronai ir padidina elektrinį puslaidininkių laidumą. Suprantama, puslaidininkių varža mažėja didėjant krūvininkų skaičiui. Nesunku suprasti, kad puslaidininkio varža priklauso nuo temperatūros eksponentiškai – $\exp(E/kT)$.



20.8 pav. Į laidumo juostą perėjusių elektronų skaičiaus priklausomybė nuo temperatūros

Be to, kai valentinės juostos elektronas, gavęs energijos kiekį, ne mažesnį už draustinės juostos plotį, peršoka į laidumo juostą, valentinėje juostoje išlieka neužimtas energijos lygmuo, kuris vadinamas **skyle**. Skylės judėjimą galima iliustruoti vienoje eilėje autobuso laukiančiais keleiviais. Kai atvažiuoja autobusas, vienas keleivis į jį įlipa, atsiranda tarpas, kurį užpildo kitas eilėje laukiantis keleivis. Kol keleiviai vienas paskui kitą juda link autobuso durų, tarpas tarp keleivių juda *priešinga* kryptimi link eilės galo (20.9 pav.).

Panašiai atsitinka ir puslaidininkyje: kai vienas elektronas peršoka į laidumo juostą, valentinėje juostoje atsiranda skylė, į kurią gali pereiti kitas valentinės juostos elektronas. Prijungus prie puslaidininkio elektrovarą, valentinės juostos elektronai bus verčiami šokti į skylę. Žinoma, labiausiai tikėtina, kad skylę užims gretimo atomo elektronas – skylė atitinkamai pasislinks kristale. Tada į ją peršoks kitas elektronas ir t.t. Akivaizdu, kad skylės slinkimo kryptis, kaip ir autobuso stotelėje, yra priešinga elektronų judėjimo krypčiai. Kadangi valentinės juostos elektronų judėjimui ekvivalentus atitinkamų skylių judėjimas priešinga kryptimi, tai praktiniu požiūriu kur kas paprasčiau nagrinėti ne elektronų, nes jų labai daug, o skylių, kurių yra mažai, judėjimą.



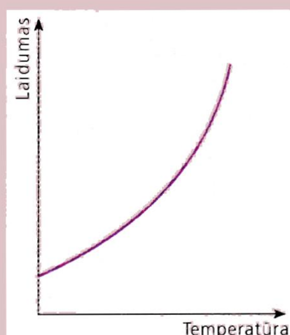
20.9 pav. Žmonių judėjimas eilėje prie autobuso durų yra panašus į elektronų judėjimą puslaidininkio valentinėje juostoje, kai joje yra skylė

Veikiami elektrovaros elektronai juda link teigiamojo, o skylės valentinėje juostoje link neigiamojo elektrodo – *tarytum* jos turėtų teigiamą krūvį. Dėl to galime teigti, kad toks puslaidininkis turi dviejų rūšių krūvininkus: elektronus laidumo juostoje ir skyles valentinėje juostoje.

Bendrą puslaidininkio laidumą sudaro abiejų tipų krūvininkų laidumai. Jų laidumus reikia sudėti, nes, nors ir juda priešingomis kryptimis, jie perneša skirtingo ženklo krūvius. Kai elektronai sužadinami ir peršoka į laidumo juostą, jie palieka *tiek pat* skylių valentinėje juostoje. Tokį puslaidininkį vadiname savuoju puslaidininkiu, o laidumą – savuoju laidumu.

Kambario temperatūroje puslaidininkiuose yra daug mažiau dalelių, galinčių pernešti elektros krūvį, negu metaluose, todėl laidumas mažesnis nei metalų. Kadangi elektronų judrumas (gebėjimas sparčiau judėti elektriniame lauke) puslaidininkiuose yra daug didesnis negu metaluose, tai elektronų dreifo greitis puslaidininkiuose paprastai yra keliolika metrų per sekundę.

Kai puslaidininkio temperatūra padidėja, elektronų (ir skylių) judrumas, kaip ir metaluose, sumažėja. Tačiau aukštesnėje temperatūroje daugiau elektronų iš valentinės juostos peršoka į laidumo juostą. Elektronų skaičius laidumo juostoje kylant temperatūrai didėja eksponentiškai, visiškai nustelbdamas judrumo sumažėjimo įtaką. Dėl to apibendrinant galima teigti, kad kylant temperatūrai ir didėjant krūvininkų skaičiui laidumo juostoje puslaidininkių laidumas didėja (20.10 pav.).



20.10 pav. Puslaidininkio savojo laidumo priklausomybė nuo temperatūros

Absoliutaus nulio temperatūroje puslaidininkio juostinė struktūra panaši į dielektriko: visiškai užpildyta juosta, draustinių energijų juosta ir tuščia juosta, kaip pavaizduota 20.7b) paveiksle. Esminis skirtumas tarp dielektrikų ir puslaidininkių tas, kad puslaidininkiuose yra mažas draustinės juostos plotis. Elektronams reikia suteikti palyginti nedaug energijos, kad jie galėtų peršokti į tuščią laidumo juostą.

Žinant draustinės juostos plotį visai nesunku kokybiškai įvertinti, ar šiluminio judėjimo energijos pakanka, kad elektronai pereitų į laidumo juostą. Šiluminė elektronų energija yra lygi sandaugai kT, kur k yra Bolcmano konstanta, o T – puslaidininkio temperatūra, išreikšta kelvinais. Paprastai draustinės juostos plotis yra gerokai didesnis už kT, tačiau pakankamas, kad jį peršoktų dalis termiškai sužadintų elektronų. Laidumo juostoje elektronai gali laisvai judėti, todėl toks puslaidininkis praleidžia elektros srovę. Dėl to viršutinė juosta ir vadinama **laidumo juosta**.



20.11a) pav. **Metalinį galio strypą ir arseno grynuolį išgarinus aukštoje temperatūroje, iš mišinio susiformavo šis galio arsenido luitas**

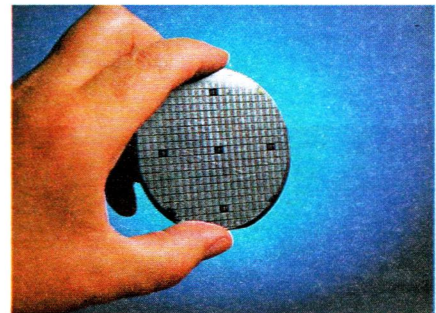
Puslaidininkinės medžiagos

Labiausiai paplitusios puslaidininkinės medžiagos yra silicis ir germanis. Jų atominės gardelės struktūra analogiška deimanto gardelės struktūrai (žr. 1-os d. 174 p.). Šie periodinės elementų lentelės (45 p.) 4 grupės atomai turi po 4 išorinius elektronus, kuriuos pasidalija užpildydami vienas kito išorinius elektroninius pasluoksnius, t. y. sudaro kovalentinius ryšius.

Silicio draustinės energijos juostos plotis yra lygus 1,1 eV, o germanio – 0,67 eV. Šiuos dydžius galima palyginti su kT verte kambario temperatūroje. Išreiškus eV vienetais, $kT \approx 0{,}026$ eV (t. y. $8{,}6 \times 10^{-5} \times 300$).

Kita puslaidininkinė medžiaga – tai galio arsenido junginys, kurio draustinės juostos plotis 1,43 eV. Galis yra III grupės, o arsenas – V grupės elementas, todėl junginyje vienam atomui vidutiniškai tenka taip pat po 4 valentinius elektronus. Taip susidaro deimanto tipo gardelė.

Daugiaelemenčiai puslaidininkiai savo savybėmis labai panašūs į vienelemenčius. Tačiau jų gamybos technologija sudėtingesnė ir pritaikyti puslaidininkiniuose prietaisuose juos yra sudėtingiau negu vienelemenčių medžiagų; tačiau, pavyzdžiui, galio arsenidas pamažu plinta. Mat jame daug didesnis elektronų greitis negu silicyje ar germanyje, todėl su galio arsenidu pagaminti prietaisai veikia daug sparčiau. Intensyviai tyrinėjami ir iš trijų rūšių atomų sudaryti puslaidininkiai.



20.11b) pav. **Silicio plokštelė: kiekvienas jos paviršiuje esantis kvadratėlis yra sudėtinga elektrinė grandinė, jungianti daugybę elementų**

Keičiant junginius sudarančių elementų santykį, galima pagaminti pageidaujamo draustinės juostos pločio puslaidininkius. Pavyzdžiui, infraraudonųjų spindulių fotokameroje naudojami puslaidininkiai, jautrūs infraraudonajai spinduliuotei. Jų veikimo principas pagrįstas tuo, jog draustinės juostos plotis atitinka infraraudonosios spinduliuotės fotonų energiją; sugertas fotonas suteikia elektronui pakankamai energijos peršokti iš valentinės į laidumo juostą. Puslaidininkiniuose lazeriuose draustinės juostos plotis parenkamas toks, kad lazeris generuotų tam tikro dažnio (ar spalvos) šviesą. Tokie lazeriai plačiai naudojami kompaktinių plokštelių grotuvuose ir optiniuose ryšiuose.

✓

Energija, reikalinga elektronams sužadinti iš valentinės juostos į laidumo, paprastai išreiškiama eV, o ne J.

Termistoriai ir fotorezistoriai

Termistoriai yra puslaidininkiniai prietaisai, kurių elektrinė varža priklauso nuo temperatūros, todėl juos patogu naudoti temperatūros pokyčiams nustatyti elektroniniu būdu. Fotorezistoriaus elektrinė varža priklauso nuo jo apšviestumo, todėl šie prietaisai naudojami automatinio valdymo sistemose, fototelegrafijoje, fotometrijoje ir kitur.

?

D Kam lygus 1 eV, išreikštas J?

E Įvertinkite, kokia dalis elektronų 300 K temperatūroje yra laidumo juostoje, jei draustinės juostos plotis yra lygus 1,1 eV? O kokia 600 K temperatūroje?

Termistoriai dažniausiai gaminami iš nikelio oksido. Šio puslaidininkio varža kylant temperatūrai mažėja ne tiesiškai, o eksponentiškai. Kaip jau anksčiau aptarėme, didėjant temperatūrai, o tai reiškia – ir šiluminio judėjimo energijai, elektronų skaičius laidumo juostoje didėja eksponentiškai.

Termistorių varžos kitimo ribos yra nuo 4,7 kΩ kambario temperatūroje iki 270 Ω ties 100 °C. Todėl termistoriai naudojami prietaisuose, kurie turi sukelti didelį išėjimo signalo pokytį net visai mažai tepakitus jutiklio temperatūrai (žr. 1-os d. 210 p.). Tokio prietaiso pavyzdys – kompiuterinė sistema, stebinti šiluminę energiją generuojantį procesą, pavyzdžiui, cheminę reakciją. Jautrus nedideliems šiluminės energijos (t. y. temperatūros) pokyčiams termistorius sukuria stiprų valdymo signalą, kuriuo galima valdyti vykstantį procesą.

Fotorezistoriai paprastai gaminami iš kadmio sulfido, kurio draustinės juostos plotis 2,6 eV – t. y. didesnis negu tipinių puslaidininkių. Į fotorezistorių krintančių fotonų energija suvartojama elektronams „perkelti" iš valentinės į laidumo juostą. Tamsoje tokio prietaiso varža maždaug lygi 1 MΩ, o apšvietus gali sumažėti iki 1 kΩ ar dar labiau, priklausomai nuo šviesos srauto stiprumo. Fotorezistoriai, kaip ir termistoriai, gali būti lengvai jungiami į elektronines grandines (žr. 1-os d. 209 ir 212 p.).



F Pavaizduokite, kaip termistoriaus varža priklauso nuo temperatūros.

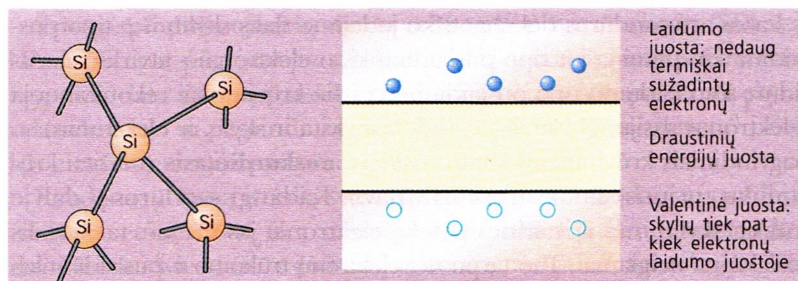
Legiruoto puslaidininkio laidumas

Įvairiuose puslaidininkiniuose prietaisuose, pavyzdžiui, tranzistoriuose, termistoriuose ar fotorezistoriuose, naudojamų puslaidininkių elektrines savybes reikia kruopščiai parinkti. Tai daroma įmaišant į juos labai nedidelius kiekius „priemaišų" – tam tikro elemento atomų. Dirbtinis priemaišų įterpimas į kristalą vadinamas **legiravimu**, o tokios medžiagos – **priemaišiniais puslaidininkiais**. Priemaišiniai atomai užima kai kurias puslaidininkio savųjų atomų vietas. Kad pakeitimas būtų sėkmingas, jų dydis turi būti panašus į puslaidininkį sudarančių atomų dydį. Kadangi paplitę puslaidininkiai, tokie kaip silicis, yra IV grupės elementai, tai legiravimui naudojami III grupės (pavyzdžiui, boras) arba V grupės (pavyzdžiui, fosforas) elementai. Legiruojant vienos ar kitos grupės elementais, gaunamos gana skirtingos gauto priemaišinio puslaidininkio savybės.

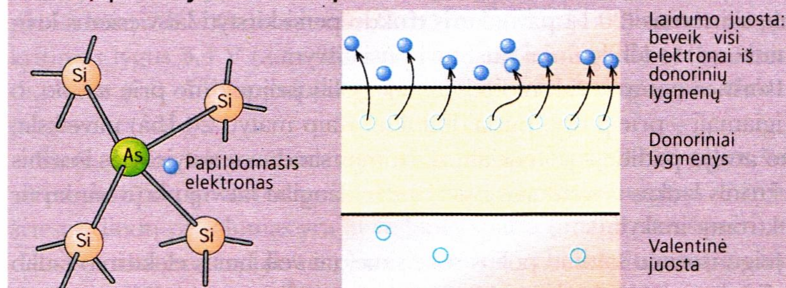
Arsenu legiruotas silicis

Silicio gardelės elementas pavaizduotas 20.12a) paveiksle. Kiekvienas silicio atomas pasidalija savo išorinio pasluoksnio elektronus su keturiais artimiausiais kaimynais ir tuo pačiu „pasiskolina" iš jų po vieną elektroną, kad galėtų užpildyti savo išorinį pasluoksnį, sudarytą iš aštuonių elektronų. Kai kuriuos silicio atomus pakeitus arseno atomais, su kiekvienu tokiu priemaišiniu atomu atsiranda ir po vieną *papildomą* elektroną (20.12b) pav.). Šie papildomieji elektronai silpnai surišti su atomais ir yra labai lengvai sužadinami į laidumo juostą (20.12b) paveikslo dešinėje). Jų energijos būsenos yra taip arti laidumo juostos, kad net ir kambario temperatūroje šie elektronai sužadinami į laidumo juostą.

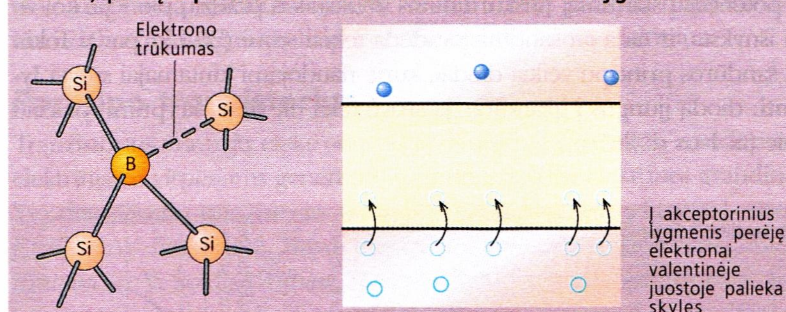
Parenkant priemaišinių atomų skaičių, galima keisti krūvį pernešančių elektronų kiekį, t.y. puslaidininkio laidumą. Priemaišiniai atomai, kurių dėka puslaidininkyje atsiranda papildomų elektronų, vadinami **donorais,** o tokios medžiagos vadinamos ***n* tipo** puslaidininkiais, nes juose vyrauja *neigiami* (**n**egative) krūvininkai.



20.12a) pav. **Grynasis silicio puslaidininkis**



20.12b) pav. **Įterpti arseno atomai sukuria donorinius lygmenis**



20.12c) pav. **Įterpti boro atomai sukuria akceptorinius lygmenis**

Boru legiruotas silicis

Dabar panagrinėsime, kas atsitinka, kai vietoj arseno naudojamas boras. Boro išoriniame pasluoksnyje yra trys elektronai, t.y. vienu mažiau nei silicyje. Dėl to vienas silicio elektronas lieka be poros, o į trūkstamą vietą lengvai priimami elektronai iš valentinės juostos. Tada valentinėje juostoje lieka skylės, kurios ir perneša elektrinį krūvį. Boro atomai vadinami **akceptoriais**, nes jie prisijungia elektronus, o tokios medžiagos vadinamos ***p* tipo** puslaidininkiais, nes jose *vyrauja* teigiami (**p**ositive) krūvininkai. Energijos juostų diagramoje akceptorinis lygmuo yra šiek tiek aukščiau valentinės juostos krašto (20.11c) pav.).

Ir *n* tipo, ir *p* tipo puslaidininkiuose yra abiejų rūšių krūvininkų. Praktiškai svarbus atvejis, kai vyrauja vieno tipo krūvininkai. Puslaidininkiuose su donorinėmis priemaišomis laidumo elektronų koncentracija daug didesnė negu skylių ($n \gg p$). Dėl to juose laidumo elektronai vadinami pagrindiniais krūvininkais, o skylės – šalutiniais krūvininkais. *P* tipo puslaidininkiuose atvirkščiai: juose pagrindiniai krūvininkai yra skylės, o šalutiniai – laidumo elektronai. Abiejų tipų krūvininkų koncentraciją galima išmatuoti remiantis Holo (*E. H. Hall*) efektu (žr. 1-os d. 254 p.).

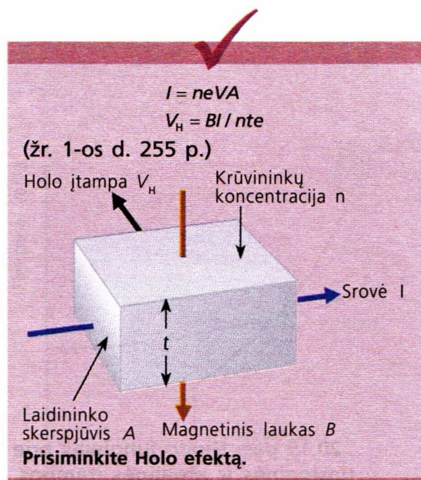
Diodas – pn sandūra

Kai sujungiame du puslaidininkius, vieną *n* tipo, o kitą *p* tipo, gauname *pn* sandūrą. Labai dažnai tai tos pačios medžiagos puslaidininkiai, į kuriuos įterptos skirtingų rūšių, t.y. akceptorinės ir donorinės, priemaišos. Skylės perneša krūvį *p* tipo, o elektronai – *n* tipo puslaidininkyje.

?

G Paaiškinkite, kaip *n* tipo puslaidininkio laidumas priklauso nuo temperatūros, jei jame krūvininkus sukuria donorinės priemaišos. (Prisiminkite, kad puslaidininkio laidumas priklauso ne tik nuo laisvųjų krūvininkų koncentracijos, bet ir nuo jų judrumo.)

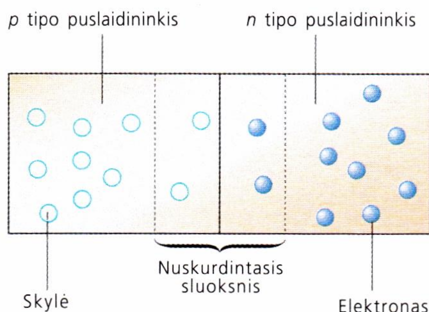
■ Žr. 2 klausimą.



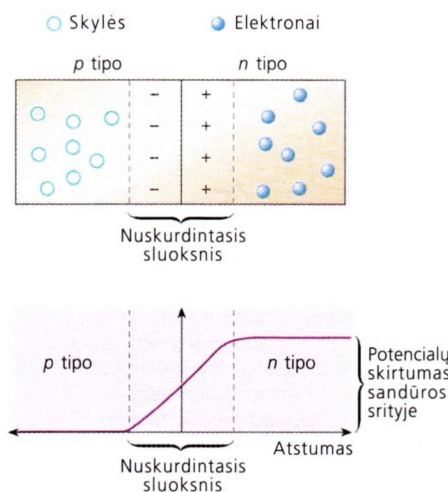
■ Pabandykite atsakyti į 3 ir 4 klausimus, pateiktus skyriaus pabaigoje.

?

H Paaiškinkite, kaip išmatavus Holo įtampą galima nustatyti, kokio tipo krūvininkai vyrauja tiriamame puslaidininkyje.



20.13 pav. **Nuskurdintasis sluoksnis *pn* sandūroje**

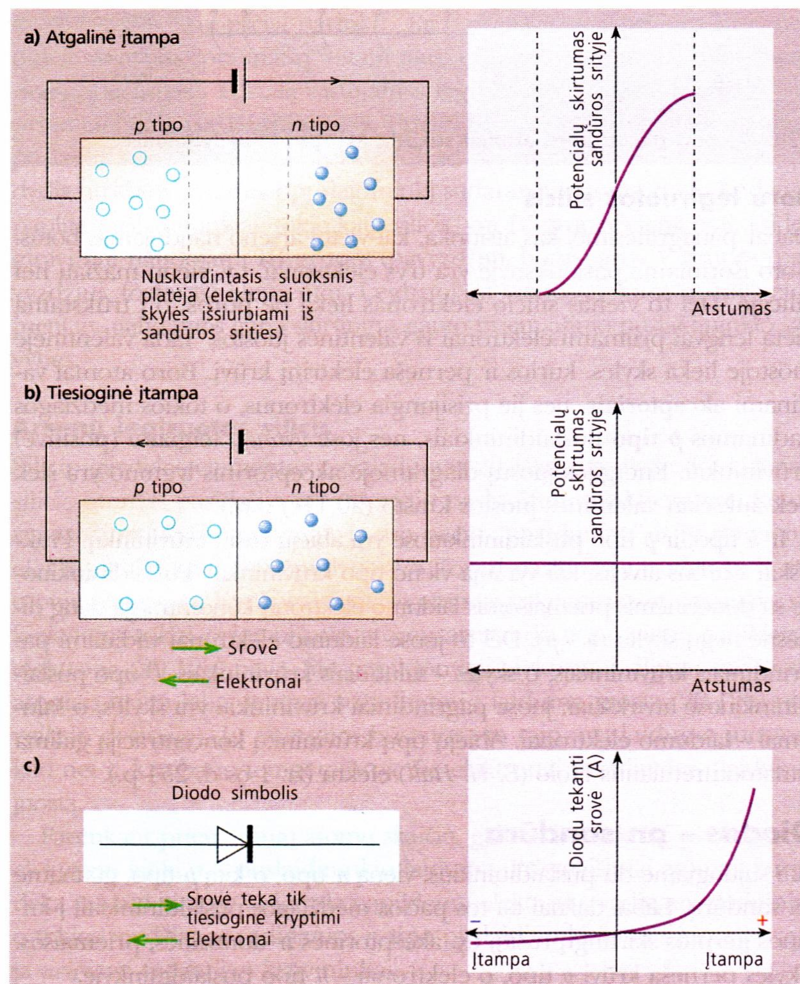


20.14 pav. **Kontaktinis potencialų skirtumas nuskurdintajame *pn* sandūros sluoksnyje**

Labai arti sandūros dėl chaotiško judėjimo dalis skylių iš *p* tipo puslaidininkio pereina į *n* tipo puslaidininkį, o elektronai – atvirkščiai. Atsidūrę kito laidumo tipo puslaidininkyje, šie krūvininkai rekombinuoja (elektronas susijungia su skyle, todėl išnyksta ir skylė, ir elektronas) su pagrindiniais krūvininkais – taip susidaro **nuskurdintasis** (mažiau krūvininkų turintis) sluoksnis (20.13 pav.). Kadangi sandūros *p* dalyje trūksta skylių, nes iš *n* srities patekę elektronai jas užėmė, tai ši dalis įsielektrina neigiamai. Tuo tarpu dėl elektronų trūkumo *n* puslaidininkyje šalia sandūros susidaro teigiamai įkrauta sritis. Taip susidaro potencialų skirtumas (20.14 pav.), kuris trukdo persiskirstyti laisviesiems krūvininkams, todėl ilgainiui nusistovi pusiausvyra.

Išorinės įtampos šaltinio teigiamąjį polių prijunkime prie *n* tipo, o neigiamąjį – prie *p* tipo puslaidininkio. Kaip matyti 20.15a) paveiksle, šiuo atveju padidėja potencialų skirtumas sandūros srityje, nes išorinis elektrinis laukas iš sandūros išsiurbs dar daugiau laisvųjų krūvininkų (ir elektronų, ir skylių).

Jeigu išorinio šaltinio polius sukeisime, tai veikiamas elektrinio lauko nuskurdintasis sluoksnis išnyks (20.15b) pav.). Šiuo atveju didinant išorinį potencialų skirtumą, nuskurdintasis sluoksnis iš pradžių plonėja, kol visai išnyksta, ir tada *pn* sandūra pradeda tekėti srovė (20.15c) pav.). Tokiu *pn* sandūros principu veikia diodai, kurie naudojami kintamajai srovei **lyginti**: diodą įjungus į grandinę, ja srovė teka tik viena kryptimi (plačiau apie tai 1-os d. 287 p.).



20.15 pav. **Diodo jungimas prie tiesioginės ir atgalinės įtampos.**

a) **Įjungus įtampą atgaline kryptimi, elektrinis laukas išsiurbia elektronus ir skyles iš sandūros srities, todėl susidaro didelis potencialų skirtumas, trukdantis elektros srovei tekėti pro sandūrą**

b) **Įjungus įtampą tiesiogine kryptimi, potencialų skirtumas sandūros srityje išnyksta**

c) **Diodu tekančios srovės stiprio priklausomybė nuo prijungtos įtampos**

Šviesą spinduliuojančių diodų arba tiesiog šviesos diodų (ŠD) veikimas taip pat pagrįstas *pn* sandūra. Tokią sandūrą įjungus tiesiogine kryptimi, dalis į *p* sritį patekusių elektronų bei į *n* sritį patekusių skylių rekombinuoja su pagrindiniais krūvininkais (elektronas „įkrinta" į skylę): elektros energija paverčiama šviesos energija.

Raudoną, geltoną ir žalią šviesą spinduliuojantys diodai jau naudojami gana seniai, tačiau tik pastaruoju metu sukurti mėlynos šviesos diodai. Mėlynai šviesai (λ = 450 nm) generuoti reikia sukurti tokią *pn* sandūrą, kurioje įtampos kritimas tiesiogine kryptimi (draustinės juostos plotis) būtų 2,8 V. Galio nitrido (GaN) *pn* sandūroje tiesioginės įtampos kritimas lygus 3,4 V (λ = 360 nm), o aliuminio nitrido (AlN) šviesos dioduose (6,2 eV) išspinduliuojamos ultravioletinio diapazono elektromagnetinės bangos.

Šiuolaikiniai šviesos diodai gali spinduliuoti kaip 500 W galios šviesoforo lempos, suvartodami dešimt kartų mažiau energijos. Svarbus šviesos diodų privalumas yra jų veikimo sparta (ima greitai švytėti), todėl visai tikėtina, kad jie netolimoje ateityje pakeis kaitinamąsias lempas, pavyzdžiui, automobilių žibintuose ar gatvių šviesoforuose. Ultravioletinę šviesą spinduliuojantys diodai turėtų pakeisti dujų išlydžio vamzdelius, naudojamus kaip fluorescencinės šviesos šaltinius.

?

I Įrodykite, kad geltoną šviesą (λ = 600 nm) skleidžiančiame šviesos diode elektronai turi įveikti 2,0 V dydžio potencialų skirtumą. (Prisiminkite, kad fotono energiją galima išreikšti sandauga *hf*.)

J Nuspaudus automobilio stabdžių pedalą, signalinės stabdžių lemputės įsižiebia tik po tam tikro laiko. Raudoną šviesą spinduliuojantis diodas įsižiebia 0,25 s sparčiau negu kaitinamoji lemputė. Kokybiškai įvertinkite šį šviesos diodo privalumą eismo saugumui gatvėje.

Pnp tipo tranzistorius

Tranzistorius yra trijų elektrodų puslaidininkinis prietaisas, naudojamas elektriniams virpesiams generuoti, stiprinti ir valdyti elektrines grandines. Yra daug įvairių tranzistorių, vieną jų, *pnp* tipo tranzistorių, 1951 metais išrado JAV fizikai Dž. Bardynas (*John Bardeen*), V. Bratenas (*Walter Brattain*) ir V. Šoklis (*William Shockley*) Belo tyrimų laboratorijoje. Tokį tranzistorių sudaro dvi arti viena kitos esančios plokščios *pn* sandūros.

Ypač sėkmingai tranzistoriai buvo pritaikyti loginėms grandinėms, naudojamoms kompiuteriuose, valdyti.



20.16 pav. **Tranzistorius**

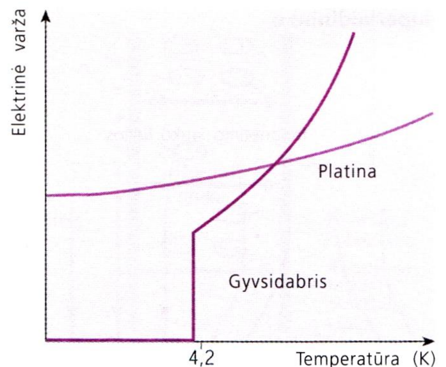
3 SUPERLAIDUMAS

1911 metais olandų fizikas H. Kamerlingas-Ones (*Heike Kammerlingh-Onnes*) aiškinosi, kas atsitinka metalų elektriniam laidumui, kai metalas atšaldomas iki helio skystėjimo temperatūros, t. y. 4,2 K. Jis nustatė, kad platinos varža sumažėja iki tam tikros pastovios vertės. Priemaišos, įterptos į platiną, tiesa, labai nedideliais kiekiais, varžą padidina.

Netikėčiausius rezultatus mokslininkas gavo tyrinėdamas gryną gyvsidabrį. Paaiškėjo, jog žemiau 4,2 K temperatūros gyvsidabris neturi jokios elektrinės varžos (20.17 pav.). Pasiekus tokią temperatūrą medžiagoje vyksta tam tikri svarbūs, tačiau gana sudėtingi pokyčiai. Šis reiškinys buvo pavadintas *superlaidumu*.

Toji temperatūra, kurią pasiekus gyvsidabris tampa superlaidus, vadinama **krizine**. Žemiau krizinės temperatūros superlaidumu pasižyminčių metalų varža tampa lygi nuliui. Be to, kad neišnyktų superlaidumas, tokiu laidininku tekančios srovės bei išorinio magnetinio lauko stiprumas turi būti mažesni už tam tikras krizines vertes.

Kuriami įvairūs prietaisai, kurių veikimo principas pagrįstas superlaidumo būsenoje vykstančiais reiškiniais. Nurodysime tik kai kuriuos: superlaidieji elektromagnetai, superlaidieji kabeliai, kompiuterių superlaidieji atminties elementai ir t. t.



20.17 pav. **Platinos ir gyvsidabrio elektrinė varža labai žemoje temperatūroje**

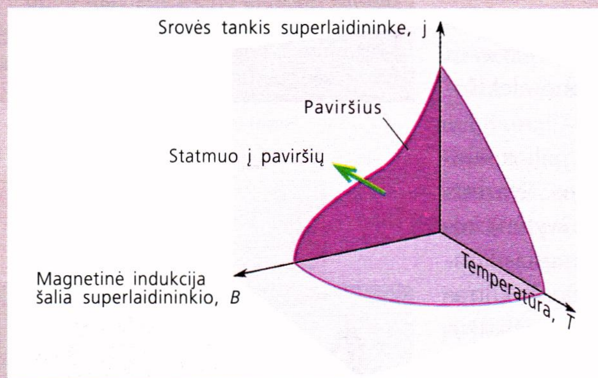
?

K Kas atsitiktų, jei branduolio magnetinio rezonanso grandinėje superlaidžios apvijos temperatūra arba srovės tankis joje staiga padidėtų?

Krizinis superlaidininko *TjB* paviršius

Krizinės superlaidumo sąlygos gali būti pavaizduotos *TjB* diagrama (20.18 pav.). Tai grafikas, kurio *x* ašyje atidėta temperatūra *T*, elektros srovės tankis *j* atidėtas *y* ašyje, o šalia superlaidininko sukurta magnetinė indukcija *B* – *z* ašyje.

TjB paviršius atitinka visus taškus, kuriuose susidaro sąlygos superlaidumui atsirasti. Bet kurio dydžio *TjB* vertei padidėjus tiek, kad jas atitinkantis taškas *TjB* diagramoje išeina už paviršiaus ribų, toje medžiagoje išnyksta superlaidumo reiškinys, t.y. ji tampa paprastu laidininku. Tokiu atveju sakoma, kad pasikeičia medžiagos būsena. (Analogiškai *pVT* diagramoje nubraižę kritinį paviršių gavome sąlygas, kada tam tikra medžiaga, pavyzdžiui, iš dujinės būsenos pereina į skystąją.) 20.1 lentelėje pateiktos kai kurių metalų ir lydinių krizinės temperatūros, kai nėra išorinio magnetinio lauko. Lentelėje yra ir skyriaus pradžioje pavaizduoto aukštos temperatūros superlaidininko $YBa_2Cu_3O_{6,5}$ (sutrumpintai YBCO) krizinė temperatūra.



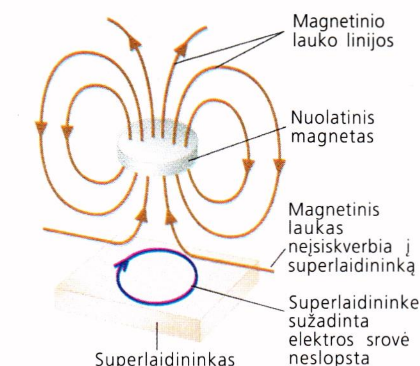
20.18 pav. **Krizinis superlaidininko *TjB* paviršius**

20.1 lentelė. **Kai kurių superlaidžių medžiagų krizinės temperatūros, kai nėra magnetinio lauko**

Medžiaga	*T*(K)
Al	1,20
Hg	4,15
Pb	7,19
Nb	9,26
Nb_3Ge	23,2
YBCO	93

Magnetinis nesvarumas ir Meisnerio (*Meissner*) efektas

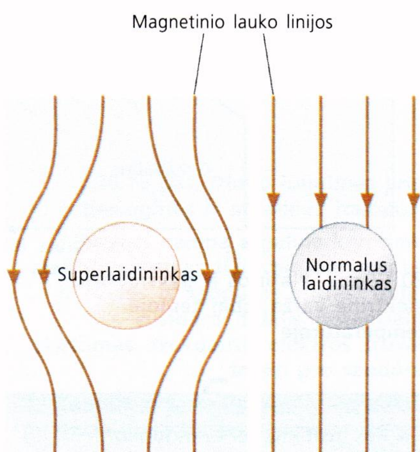
Superlaidininkas gali išlaikyti virš jo paviršiaus esantį nuolatinį magnetą (20.19 pav.). Kai tik magnetas pradeda kristi, jo kuriamas magnetinis laukas pagal Faradėjaus indukcijos dėsnį (žr. I-os d. 264 p.) indukuoja elektrovaros jėgą superlaidininke: jo paviršiuje krūviai pradeda tekėti uždarais kontūrais be jokio pasipriešinimo. Pagal Lenco (*Lenz*) taisyklę atsiradusi elektrovara priešinasi ją sukėlusiam magneto judėjimui, todėl magnetas lieka kyboti ore.



20.19 pav. **Magnetinis nesvarumas virš superlaidininko**

Norint išsamiau paaiškinti šį reiškinį, reikia pridurti, kad indukcinės srovės stipris didėja tol, kol jos kuriamas magnetinis laukas tampa lygus magneto laukui, tik priešingos krypties. „Supersrovė" superlaidininko paviršiuje gali tekėti neslopdama, todėl ji veikia kaip nuolatinės veikos magnetas. Tokio magneto polių kryptis yra priešinga nuolatinio magneto poliams, todėl magnetai vienas kitą stumia. Atstumas tarp jų nusistovi toks, kad stūmos jėga būtų lygi sunkio jėgai.

Išorinio magnetinio lauko linijos neįsiskverbia į superlaidininką. Šis reiškinys vadinamas **Meisnerio** efektu. Superlaidininkui atsidūrus vienalyčiame magnetiniame lauke, lauko linijos išsigaubia apie superlaidininko paviršių (20.20 pav.). Šis reiškinys nebūdingas normaliems laidininkams. Superlaidumą galima paaiškinti tik remiantis sudėtingais kvantinės mechanikos metodais (jų čia nenagrinėsime).



20.20 pav. **Magnetinis laukas į superlaidininką neįsiskverbia, tačiau tai nebūdinga įprastiems laidininkams**

Aukštų temperatūrų superlaidininkai

Kaip jau minėjome, didžiausias įtaisų su superlaidžiais elementais trūkumas – labai žema jų darbinė temperatūra. Dėl to ilgą laiką superlaidumas buvo tik siaurų mokslinių tyrinėjimų objektas. Susidomėjimas superlaidininkais atgimė 1987 m., kai buvo atrastas superlaidininkas, kurio krizinė temperatūra 93 K. Tai ta pati skyriaus pradžioje paveikslėlyje pavaizduota medžiaga. Jos apytikslė formulė yra $YBa_2Cu_3O_{6,5}$, tačiau dažniausiai ji vadinama trumpiau: YBCO, pagal pirmąsias šią medžiagą

sudarančių elementų pavadinimų raides. Po to buvo atrasta ir keliolika kitų aukštos krizinės temperatūros superlaidininkų, kurie visi yra sudėtingi junginiai su tam tikru elementų santykiu.

Aukštatemperatūrių superlaidininkų krizinė temperatūra didesnė už azoto skystėjimo temperatūrą (90,2 K), todėl azotu, kurį suskystinti nereikia daug pastangų, patogu juos atšaldyti. Pagrindinė problema, kurią tenka spręsti superlaidininkų kūrėjams, yra dideli tūriniai įtempimai dėl skirtingų tokias sudėtines medžiagas sudarančių atomų matmenų. Vis tik labai tikėtina, kad netolimoje ateityje pavyks sukurti superlaidininkus, veikiančius kambario temperatūroje.

■ Žr. 5 klausimą.

?

L Nurodykite bent tris sritis, kuriose galėtų būti pritaikyti kambario temperatūros superlaidininkai (jeigu jie bus atrasti). Kiekvienu atveju paaiškinkite, kuo superlaidininkai būtų pranašesni už įprastus laidininkus.

?

M Kokią žinote dar vieną (be stroncio titanato) keramikinę medžiagą? Prisiminkite elektrinės talpos formulę, pateiktą 1-os d. 237 p.:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A}{d}$$

4 DIELEKTRIKAI

Jau išsiaiškinome, kad izoliatorių juostinė struktūra pasižymi dideliu draustinių energijų intervalu. Medžiagos, kurios nepraleidžia elektros srovės, dažniau yra vadinamos **dielektrikais**. (Dielektrikų panaudojimą kondensatoriuose aptarėme 1-os d. 237 p.) Pagrindinė dielektriko fizikinė charakteristika yra (santykinė) dielektrinė skvarba, kuri apibrėžiama santykiu:

$$\varepsilon_r = \frac{\text{kondensatoriaus, kurio elektrodai atskirti dielektriku, talpa}}{\text{kondensatoriaus, kurio elektrodai atskirti oru, talpa}}$$

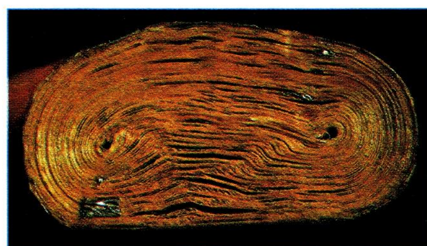
Visų medžiagų dielektrinė skvarba yra didesnė už 1. Pavyzdžiui, oro dielektrinė skvarba lygi 1,0006, teflono (polimeras, naudojamas izoliacijai) – 2,1, stroncio titanato (SrTi) – net 310. Dielektriku užpildžius sritį tarp kondensatoriaus elektrodų, kondensatorius gali sukaupti daug didesnį krūvį nei tuo atveju, kai tarp jo elektrodų yra oras, t. y. dielektrikas padidina kondensatoriaus talpą.

Elektrinis laukas tarp kondensatoriaus elektrodų *poliarizuoja* dielektriko molekules. Poliarizuotose molekulėse elektrinio lauko veikiami neigiami ir teigiami krūviai pasislenka vienas kito atžvilgiu. Kaip parodyta 20.21b) pav., dielektriko paviršiuje prie neigiamo kondensatoriaus elektrodo susidaro teigiamų krūvių perteklius ir lygiai tokio paties dydžio neigiamų krūvių perteklius priešingame paviršiuje.

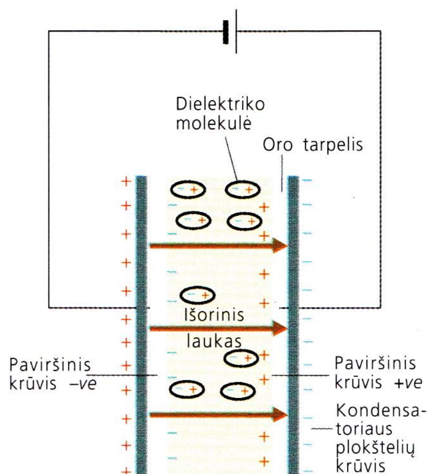
Prie kondensatoriaus prijungus nuolatinės įtampos šaltinį, iš jo į elektrodus turi pritekėti tiek krūvių, kad būtų palaikoma pastovi įtampa tarp kondensatoriaus elektrodų bei sukuriamas tą įtampą atitinkantis elektrinis laukas dielektrike. Kuo daugiau molekulių poliarizuoja tam tikro stiprumo elektrinis laukas, tuo didesnis papildomas krūvis gali būti sukauptas kondensatoriuje. Medžiagos molekulių poliarizuojamumą rodo dielektrinė skvarba: kuo ji didesnė, tuo molekulės poliarizuojamos lengviau.

Prie kondensatoriaus elektrodų galima prijungti tik tam tikro dydžio įtampą, nes stiprėjant elektriniam laukui kondensatoriaus dielektrikas gali būti pramuštas. Pavyzdžiui, sausas oras normaliomis sąlygomis pramušamas, kai elektrinio lauko stiprumas siekia apie 3000 V·mm^{-1}.

Šiuolaikinės dielektrinės medžiagos atlaiko stipresnius elektrinius laukus, nes jas dabar pavyksta pagaminti grynesnes. Dielektrikai su priemaišomis pramušami silpnesniuose elektriniuose laukuose. Pramušimo metu nedidelėje dielektriko srityje susidaro laidus kanalas. Iš pradžių stipriame elektriniame lauke pažeidžiamiausioje dielektriko vietoje išsilaisvina nedidelis kiekis krūvininkų, jie įgreitėja tiek, kad jonizuoja aplink esančias molekules. Galų gale didelė įsibėgėjusių krūvininkų griū-



20.21a) pav. **Kondensatoriaus pjūvis: kad būtų didesnis plokštelių plotas, metalinė folija kartu su dielektriko sluoksniu suvyniojama į ritinį**

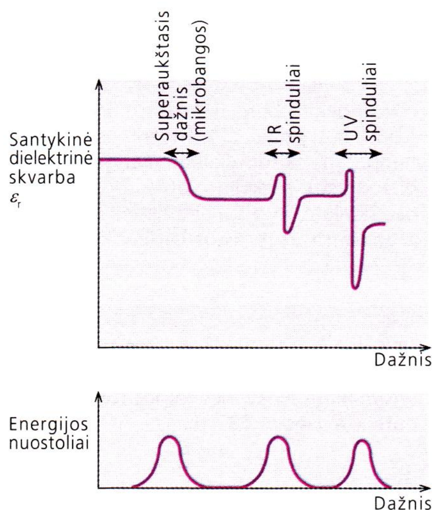


20.21b) pav. **Dielektriko poliarizacija**

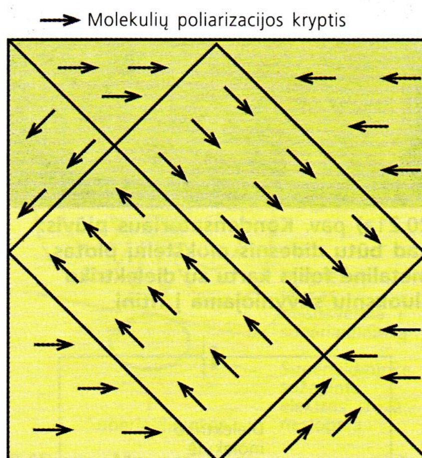
?

N Tarkime, ribinis elektrinis laukas, kurį atlaiko keramikinis izoliatorius, yra 8 kV·mm^{-1}. Koks turi būti tokio izoliatoriaus, naudojamo 500 kV elektros energijos perdavimo linijos laidams izoliuoti, storis?

■ Žr. 6 klausimą.



20.22 pav. **Tipinės dielektriko santykinės dielektrinės skvarbos (a) ir energijos nuostolių jame (b) priklausomybės nuo dažnio**



20.23 pav. **Vidinė domeninė feroelektriko struktūra**

tis pramuša dielektrike laidų kanalą (Dielektriko pramušimą galima palyginti su sniego griūtimi kalnuose, kurią sukelia pradėjęs žemyn riedėti nedidelis sniego gniutulėlis.)

Iki šiol nagrinėjome, kas vyksta, kai dielektriką veikia pastovus elektrinis laukas. Kai dielektrikas veikiamas kintamojo elektrinio lauko, jo savybės kinta priklausomai nuo to, kaip greitai jo molekulių poliarizaciniai krūviai geba pakeisti savo orientaciją. Tai visų pirma nulemia tarpatominio ryšio tipas dielektriko molekulėse.

Dielektrinės skvarbos priklausomybė nuo dažnio (20.22 pav.) atspindi medžiagos savybes kintamajame elektros lauke. Kai elektrinio lauko kryptis labai greitai kinta, polinės molekulės sukiojasi viena kitos atžvilgiu. Susidurdamos gretimos molekulės sąveikauja, ir tai sukelia energijos nuostolius. Tuo būdu kintamosios srovės šaltinio energija virsta šilumine energija, nes suteikia tam tikrą judesio kiekį molekulėms.

Kintamasis elektrinis laukas gali versti krūvininkus ne tik suktis, bet ir judėti lauko kryptimi. Nuo dalelės masės priklauso, kokiu dažniu laukas turi keisti kryptį, kad ji suspėtų paskui lauko kitimą. Atome sparčiausiai savo kryptį gali pakeisti elektronas, todėl dielektrikuose, kuriuose nėra polinių molekulių, susidaro labai aukštais dažniais kintančių laukų energijos sugertis.

Feroelektrikai

Kai kurios medžiagos savaime poliarizuojasi, t. y. jose krūviai pasislenka vienas kito atžvilgiu ir tuomet, kai nėra išorinio elektrinio lauko. Tokios medžiagos vadinamos **feroelektrikais**. Tai nereiškia, kad jos yra pagamintos iš geležies (analogija su feromagnetikais), tačiau, panašiai kaip lydiniai, kurių sudėtyje yra geležies, pasižymi nuolatiniu magnetizmu, taip ir feroelektrikai sukelia nuosavą elektrinį lauką. Žymiausi feroelektrikų pavyzdžiai yra kvarcas ir bario titanatas.

Iš šiuolaikinių dirbtinių medžiagų verta paminėti medžiagą, kuri sutrumpintai vadinama PZT. Tai yra švino (**Pb**), cirkonio (**Zr**) ir titano (**Ti**) oksidų lydinys, kurio savybės gali būti keičiamos parenkant skirtingus lydinio komponentų santykius. Pavyzdžiui, ši medžiaga gali būti naudojama povandeninių detektorių sistemose tam tikro dažnio ultragarso bangoms aptikti.

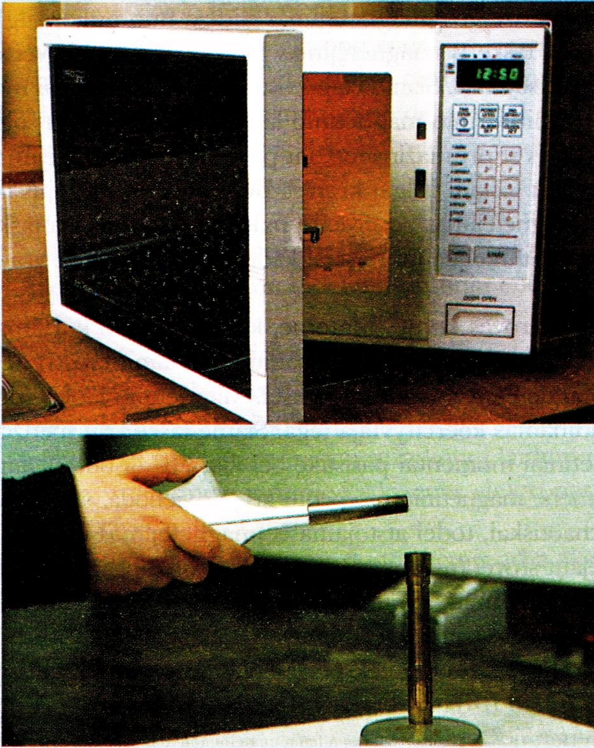
Krūvių poliarizacijos kryptis nebūtinai vienoda visame feroelektriko tūryje. Dažniausiai poliarizacija pasižymi domenine struktūra (20.24 pav.): krūvių poliarizacijos kryptis pavieniame domene vienoda, tačiau skirtinguose domenuose – skirtinga.

Domenine dielektrikų struktūra pagrįstas **pjezoelektrinis** efektas, kai mechaninė energija medžiagoje paverčiama elektrine. Jei pjezoelektriniame kristale yra vienos krypties poliarizacija, tai išilgai tos krypties jis šiek tiek *ilgesnis* nei tuo atveju, kai domenai orientuoti chaotiškai – tada viso kristalo kuriamo elektrinio lauko stiprumas lygus nuliui. Dėl to keičiant bendrą poliarizaciją kristale galima sukelti įtempimus arba kuriam laikui padidinti jo ilgį.

Svarbiausias pjezoelektrikų privalumas yra greita reakcija į poveikį – jų pagrindu sukonstruoti elementai gali veikti megahercų dažniais. Pjezoelektrikas gali veikti dviem būdais: išoriniu lauku sukeliant įtempimą arba mechaniškai sužadinant vidinį lauką. Nustojus veikti kristalas grįžta į pradinę padėtį. Remiantis pirmuoju būdu galima sukonstruoti labai didelio svyravimų dažnio mechaninės švytuoklės analogą. Dėl to pjezoelektrikai naudojami laikrodžiuose kaip labai tikslūs vibratoriai vietoj įprastų mechaninių švytuoklių. Dar jie gali būti taikomi kibirkštiniuose degikliuose, kaip aprašyta kitame puslapyje teminiame straipsnyje.

Žr. 7 klausimą. ■

ELEKTRINIAI LAUKAI VIRTUVĖJE



Šiuo metu buityje labai paplitusių **mikrobanginių krosnelių** veikimo principas pagrįstas energiją sugėrusių dalelių savybe įgauti papildomą judesio kiekį. Mikrobangų diapazono lauko dedamoji sąveikauja su maiste esančiomis vandens molekulėmis. Vandens molekulės polinės, todėl kintamajame lauke jos sukiojasi ir smarkiai sugeria energiją. Tokiu būdu elektromagnetinio lauko energija virsta šilumine – maistas įkaista.

Daugelis virtuvėje turi ir dujinės viryklės **kibirkštinį degiklį**, kuriam nereikia energijos šaltinio. Pakanka spustelėti mygtuką, pritvirtintą prie specialaus keramikinio kristalo, ir blyksteli kibirkštis.

Kristalas suspaudžiamas iš dviejų pusių: iš priekio ir iš priešingos pusės, kur jis pritvirtintas. Kadangi suspaustos kristalo molekulės deformuojasi, krūviai taip pat pasislenka. Vienas kito atžvilgiu pasislinkę krūviai sukuria elektrinį lauką. Tokia savybe pasižyminčios medžiagos vadinamos **pjezoelektrikais** („piezo“ reiškia slėgį). Degiklyje pjezoelektrikas įjungtas į grandinę, kurioje yra mažas tarpelis. Paspaudus mygtuką susidaręs elektrinis laukas sukuria aukštą įtampą ties tuo tarpeliu. Kai jį pasiekia dujos, įvyksta elektros iškrova, ir dujos užsiliepsnoja.

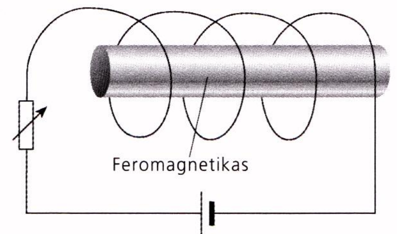
20.23 pav. Viršuje – **Mikrobanginė krosnelė**; apačioje – **kibirkštinis degiklis**

5 MAGNETINĖS MEDŽIAGOS

Kai kalbėjome apie feroelektrines medžiagas, kurios dėl molekulių poliarizacijos tampa nuolatiniais elektrinio lauko šaltiniais, užsiminėme ir apie geležies nuolatinį įmagnetėjimą. Lengvai įmagnetinamos medžiagos, tokios kaip geležis, nikelis, kobaltas ar jų lydiniai, vadinamos **feromagnetikais**. Kaip ir feroelektrikų atveju, feromagnetizmą sąlygoja vidinės atomų savybės. Be to, feromagnetikai, kaip ir feroelektrikai, pasižymi domenine struktūra.

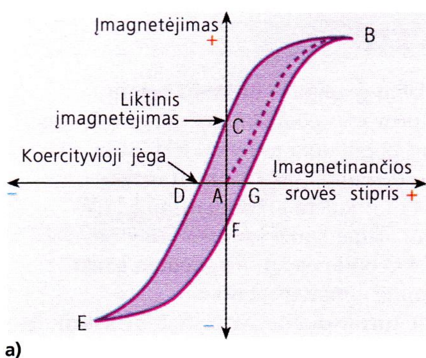
Paprastai magnetinius laukus siejame su judančiais krūviais, dažniausiai elektronais. Krūviams judant laidininku, aplink jį susidaro magnetinis laukas (žr. 1-os d. 269 p.). Atomus taip pat galima įsivaizduoti kaip mažus magnetukus, nes daugelis atomų, ypač feromagnetikus sudarantys atomai, turi vadinamuosius magnetinius momentus. Kaip laidininke su srove, taip ir feromagnetinėse medžiagose magnetinį lauką turi sukelti judantys krūvininkai: jose laukas atsiranda dėl poros nesudariusių išorinio atomo pasluoksnio elektronų judėjimo. Nors daugelis atomų turi magnetinius momentus, tačiau atomai dažnai įeina į sudėtingesnius junginius, pavyzdžiui, molekules, todėl jų visų magnetiniai momentai orientuoti chaotiškai. Dėl to beveik visų medžiagų bendras magnetinis momentas lygu nuliui. Yra tik keletas elementų, iš kurių svarbiausi – geležis, kobaltas ir nikelis (377 p.), kuriuose atomų magnetiniai momentai taip pasukti, kad palaiko vienas kito kryptį.

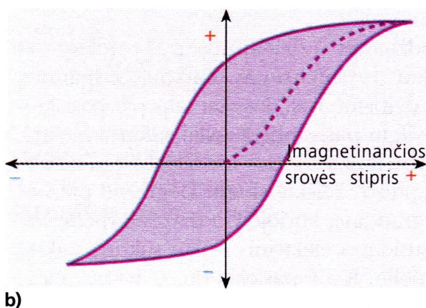
Norint iš feromagnetinės medžiagos padaryti nuolatinį magnetą, jos atomų magnetinius momentus reikia priversti pasisukti ta pačia kryptimi, pavyzdžiui, pavyzdėlį įkišti į solenoidą (20.25 pav.). Kuo daugiau solenoidas turi apvijų, tuo stipresnis jomis tekančios srovės kuriamas magnetinis laukas, nukreiptas lygiagrečiai solenoido ašiai.



20.25 pav. **Solenoide įmagnetinamas feromagnetiko strypelis**

Prisiminkite, kad ilgo solenoido viduje magnetinė indukcija yra proporcinga juo tekančios srovės stipriui: $B = \mu_0 nI$, kur n yra vijų skaičius ilgio vienete.





20.26 pav. **Minkštamagnetės** a) **ir kietamagnetės** b) **medžiagos histerezės kreivės**

Feromagnetikas įmagnetėja tuo stipriau, kuo solenoidu teka didesnė srovė, tačiau ši priklausomybė ne visada yra tiesinė. Pažvelkite į 20.26a) paveikslą: medžiagos įmagnetėjimas didėja nuo nulio išilgai pradinės kreivės AB. Taške B įmagnetėjimas pasiekia didžiausią vertę, t. y. magnetas tampa **įsotintas**. Šiame etape visų atomų magnetiniai momentai pasisukę išilgai išorinio magnetinio lauko krypties. Jeigu solenoidu tekančios srovės stiprį mažinsime, tai pavyzdėlio įmagnetėjimas taip pat mažės, tačiau lėčiau: išilgai kreivės BC. Srovei sumažėjus iki nulio, medžiagos įmagnetėjimas neišnyksta, magnetinės indukcija taške C vadinama **liktine indukcija**. Tai reiškia, kad medžiaga vis dar yra iš dalies įmagnetinta.

Dabar pakeiskime srovės kryptį. Matome, kad solenoido kuriamas priešingos krypties magnetinis laukas turi padidėti iki tam tikros vertės, kol pavyzdėlio įmagnetėjimas visiškai išnyksta. Magnetinio lauko stiprumas taške D vadinamas **koercityviąja jėga**. Šiame taške visų medžiagos atomų magnetiniai momentai pasisukę bet kaip. (Gali būti ir taip, kad atskirame domene magnetinių momentų kryptis vienoda, tačiau domenai pasisukę chaotiškai, todėl atstojamasis įmagnetėjimas lygus nuliui.) Toliau stiprėjant srovei (magnetiniam laukui) indukuojamas pavyzdėlio įmagnetėjimas priešinga kryptimi, kol taške E visų atomų magnetiniai momentai pasisuka viena kryptimi, t. y. pasiekiama sotis.

Jeigu kaitaliodami srovę tęstume eksperimentą, tai pavyzdėlio įmagnetėjimas slinktų išilgai uždaros kreivės BDEGB. Kreivės ribojamas plotas rodo, kiek energijos prarandama vieno ciklo metu. Ši energija išeikvojama magnetui kaitinti. Jeigu šis plotas mažas, tai sakoma, kad pavyzdėlį sudaro **minkštamagnetė** medžiaga, t.y. tokia, kuri įmagnetinta lengvai praranda magnetizmą. Jeigu kreivės ribojamas plotas didelis ir koercityvioji jėga didelė, tai tokia medžiaga **kietamagnetė**, nes įmagnetinta ji lengvai nepraranda magnetizmo (20.26 pav.): norint ją išmagnetinti, reikia stiprios srovės.

Kietamagnetės medžiagos labiausiai tinka nuolatinių magnetų gamybai, nes jie turėtų neišsimagnetinti ilgą laiką. Minkštamagnetės medžiagos nesipriešina permagnetinimui, energijos nuostoliai jose yra nedideli, todėl tokios medžiagos tinka transformatorių šerdžių gamybai. Plienas yra sunkiai įmagnetinamas, todėl jis yra *kietamagnetė* medžiaga; tuo tarpu geležis įmagnetinama lengvai, todėl yra *minkštamagnetė*.

Dar kartą žvilgterėkime į 20.26 paveikslą. Bet kuri srovė, silpnesnė už įsotinimo, turi dvi galimas maksimalias pavyzdėlio įmagnetėjimo vertes. Kuri vertė teisinga, priklauso nuo to, ar didiname solenoidu tekančios srovės stiprį ar jį mažiname, nes įmagnetėjimas priklauso nuo pavyzdėlio įmagnetinimo iki tol – tai galima nustatyti iš srovės ir įmagnetėjimo grafiko. Sakoma, kad fizikinio dydžio vertė priklauso nuo kelio, o 20.26 paveiksle pavaizduota kreivė vadinama **histereze**.

Kai matavimams kintamajame magnetiniame lauke naudojamas elektromagnetas, stengiamasi, kad histerezės kilpa būtų kuo mažesnė. To siekiama naudojant labai minkštas magnetines medžiagas, kurioms įmagnetėjimo priklausomybė nuo srovės yra beveik tiesinė. Tokiu atveju energijos nuostoliai magnetinėje medžiagoje vieno ciklo metu yra nežymūs.

?

O Tam tikroje magnetinėje medžiagoje atomų magnetiniai momentai yra orientuoti viena kryptimi. Kokia srovė – kintamoji ar nuolatinė – turi tekėti solenoidu, kad tos medžiagos pavyzdėlis išsimagnetintų? Ar galite sugalvoti ir kitokius pavyzdėlio išmagnetinimo būdus?

Žr. 8 klausimą. ■

SANTRAUKA

Išnagrinėję šį skyrių jūs turėjote sužinoti šiuos dalykus:

- Kai atomai suartėja, elektronų energijos lygmenys suskyla ir išplinta, todėl susidaro energijų juostos.
- Metalai praleidžia elektros srovę dėl to, kad elektronai gali judėti per iš dalies užpildytos laidumo juostos energijos lygmenis.
- Izoliatoriai negali praleisti elektros srovės, nes jų valentinė juosta visiškai užpildyta, o visiškai tuščia laidumo juosta atskirta dideliu draustinių energijų tarpu.
- Grynuose puslaidininkiuose laidumo ir valentinę juostą skiria labai nedidelis energijų tarpas, todėl dalis elektronų už absoliutų nulį aukštesnėje temperatūroje gali būti termiškai sužadinta į laidumo juostą; valentinėje juostoje kiekvienas elektronas vietoj savęs palieka skylę.
- Puslaidininkius legiruojant donorinėmis arba akceptorinėmis priemaišomis, gaunami atitinkamai *n* tipo arba *p* tipo puslaidininkiai.
- Metalų elektrinis laidumas mažėja, kai jo temperatūra didėja, tuo tarpu grynojo puslaidininkio laidumas didėja.
- Remiantis Holo efektu galima nustatyti legiruoto puslaidininkio krūvininkų tipą ir jų skaičių.
- Superlaidininkai pasižymi superlaidumu tik tada, kai temperatūra, srovės tankis ir išorinio magnetinio lauko stipris yra mažesni už tam tikras krizines vertes.
- Superlaidininkai išstumia magnetinį lauką; tai yra Meisnerio efektas.
- Dielektrikuose esančius krūvius galima poliarizuoti. Kai tarpas tarp kondensatoriaus elektrodų užpildomas dielektriku, kondensatorius gali sukaupti daugiau krūvių negu tuo atveju, kai tarp elektrodų yra oras.
- Minkštamagnetės ir kietamagnetės medžiagos pasižymi histerezės kilpa; kilpos ribojamas plotas yra didesnis kietamagnetėms medžiagoms.

KLAUSIMAI

1 Paaiškinkite dreifo greičio sąvoką metalų laidumo kontekste. Laido spindulys r = 1,00 mm, juo teka I =5,0 A stiprio elektros srovė. Laidas padarytas iš metalo, kuriame laisvųjų elektronų tankis 9,0 × 10^{28} elektronų m^{-3}. Įvertinkite elektronų dreifo greitį.

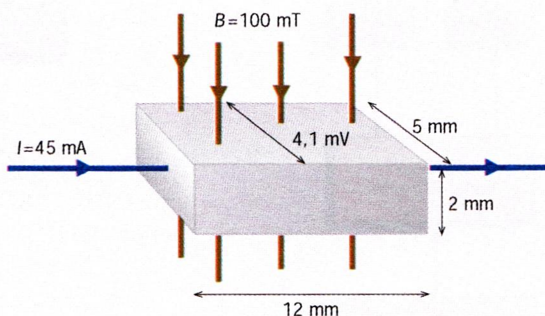
2 Jūs turite trijų puslaidininkių pavyzdžius: **(i)** gryno germanio, **(ii)** stibiu (V grupė) legiruoto germanio ir **(iii)** indžiu (III grupė) legiruoto germanio.

a) Kokia kiekvienu atveju yra krūvininkų prigimtis?

b) Nubraižykite gryno germanio pavyzdėlio varžos priklausomybę nuo temperatūros. Ar ši priklausomybė bus tokia pat kitiems dviem pavyzdžiams? Paaiškinkite.

3 Kodėl matuojant Holo efektą metale reikia naudoti storą metalinę foliją, tuo tarpu stebint šį efektą puslaidininkyje pakanka vos keleto mm storio pavyzdžio?

4 Nuolatinė 45 mA srovė teka pro stačiakampį *n* tipo puslaidininkio gabalėlį, kurio dydis 12×5 ×2 mm, kaip pavaizduota 20.K4 paveiksle. Puslaidininkis padedamas į vienalytį magnetinį lauką, kurio stipris 100 mT, statmenai lauko linijoms. Tarp priešingų plokštumų išmatuotas potencialų skirtumas lygus 4,1 mV.



20.K4 Holo efekto matavimo pavyzdys

Paaiškinkite, kodėl atsiranda šis potencialų skirtumas ir apskaičiuokite laisvųjų elektronų tankį puslaidininkyje.

5 Laidas, supintas iš dviejų rūšių gijų – vario ir tam tikro superlaidininko – yra žemos temperatūros aplinkoje. Netyčia superlaidininkas perėjo į normalaus laidininko (su elektrine varža) būseną.

a) Kokių sąlygų pasikeitimas galėjo nulemti superlaidininko virsmą?

b) Aptarkite, kaip dabar teka elektros srovė. Pagalvokite, kodėl superlaidininkas buvo sumaišytas su variu.

c) Tarkime, kad visas šilumos perteklius pasišalina variu. Nurodykite, kokie tada vyksta pokyčiai.

6

a) Plokščiasis kondensatorius sudarytas iš dviejų lygiagrečių elektrodų, kurių kiekvieno plotas lygus $A = 36\ \text{mm}^2$, o atstumas tarp jų $d = 3$ mm. Kondensatorius prijungtas prie 3 kV įtampos. Raskite elektrodų sukauptą krūvį.

b) Plokštelė, pagaminta iš plastikinio izoliatorius, kurio dielektrinė skvarba lygi 3,00, įstatoma tarp kondensatoriaus elektrodų taip, kad užpildytų visą tarpą. Tuomet grandine prateka tam tikras krūvis. Paaiškinkite, kodėl tai vyksta. Apskaičiuokite pratekėjusio krūvio dydį.

7

Kibirkštiniame degiklyje yra stačiakampis pjezoelektrinės keramikos gabalėlis, kurio pagrindų matmenys 2×2 mm, o storis 1 mm. Elektrodai pritvirtinami prie kvadratinių pagrindų. Jie veikiami 30 N jėga. Pjezoelektrikas generuoja $30\ \text{C} \cdot \text{m}^{-2}$ dydžio paviršinį krūvį kiekvienam įtempimo vienetui. Susidaręs paviršinis krūvis yra proporcingas įtempimui.

a) Keramikos Jungo modulis (žr. 1-os d. 94 p.) yra lygus $70\ \text{GN} \cdot \text{m}^{-2}$. Apskaičiuokite įtempimą keramikoje.

b) Apskaičiuokite keramikos paviršiuje susidariusį krūvį.

c) Keramika gali veikti kaip plokščiasis kondensatorius. Pasinaudokite formule $C = (\varepsilon_0\ \varepsilon_r\ A)/d$ ir apskaičiuokite keramikos elektrinę talpą bei įtampą tarp jos plokštelių kvadratinių paviršių. Santykinė dielektrinė keramikos skvarba lygi 68.

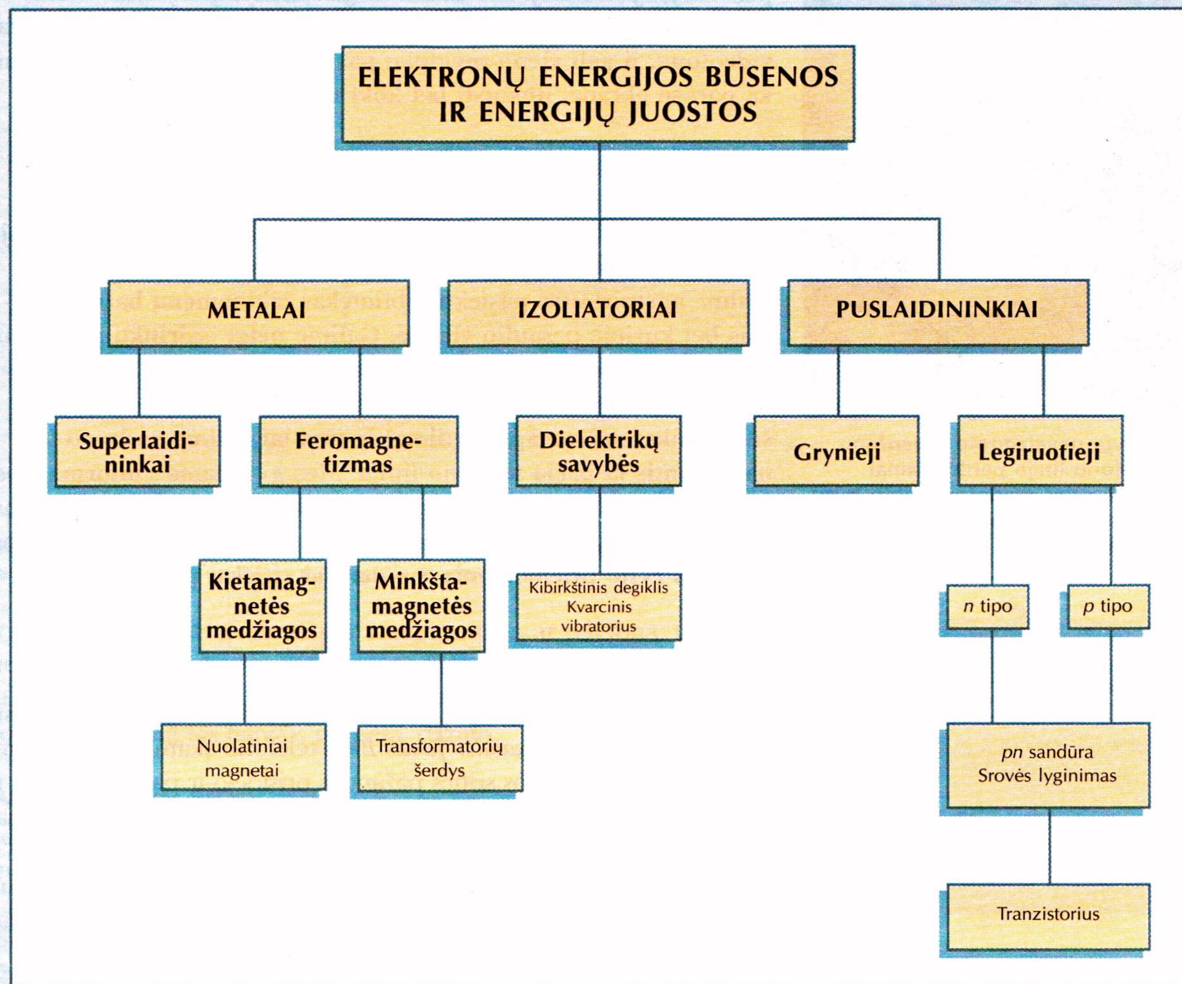
d) Ar gali šis pjezoelektrinis įtaisas sukurti pakankamai aukštą įtampą, kuri galėtų pramušti 1,5 mm storio sauso oro tarpą? (Oras pramušamas, kai elektrinis laukas didesnis kaip $30\ \text{kV} \cdot \text{cm}^{-1}$)

8

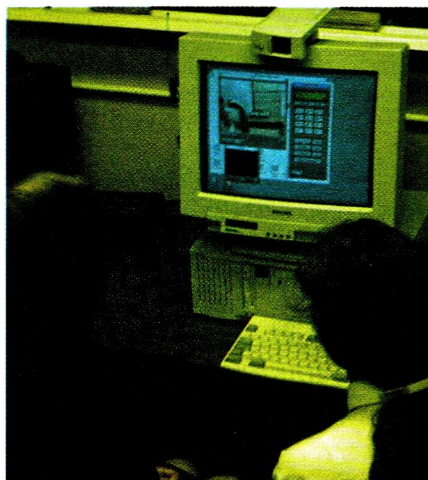
Paaiškinkite, kodėl plieninis strypelis, ištrauktas iš solenoido, kuriuo teka nuolatinė srovė, yra stipriai įmagnetintas, tačiau nepasižymi jokiu magnetizmu, kai jis ištraukiamas iš solenoido, kuriuo teka kintamoji srovė. Argumentus pagrįskite domenine magnetizmo teorija.

ELEKTROMAGNETINĖ SPINDULIUOTĖ, ATOMAI, SPEKTRAI IR KVANTAI

Šio skyriaus schema sieja pagrindines krūvių pernešimo ir pasiskirstymo metaluose, puslaidininkiuose ir kitose medžiagose idėjas, sąvokas bei jų tarpusavio priklausomybes. Taip pat schemoje nurodyta, kokią svarbiausią informaciją jūs turite sužinoti pagal mokymosi programą. Ja remdamiesi galite pasitikrinti žinias ir išsiaiškinti klausimus, kuriuos jums reikia nuodugniau pasimokyti.



21 Komunikacija ir ryšiai



Paveikslėlyje pavaizduoto videofono viena telefono linija perduodamai informacijai prieš dvidešimt metų būtų prireikę viso per Atlantą nutiesto kabelio pajėgumo

MERGAITĖ PAVEIKSLĖLYJE yra mokykloje ir dalyvauja pamokoje. Ji naudojasi videofonu. Jos mokytojas yra už kelių dešimčių ar šimtų kilometrų kitoje mokykloje, tačiau naudodamasi videofonu, ji gali vienu mygtuko paspaudimu parodyti mokytojui, ką parašė ekrane, nusiųsti bet kokį rašto darbą.

Jau dabar videofonai yra viena iš galimybių, kurias gali suteikti telefono ryšys. Kai kuriose pasaulio šalyse daugelis žmonių jau turi įsirengę videofonus savo namuose, vis labiau plinta ir nešiojamieji vidoefoniniai įrenginiai. Naudodamiesi telefono linijomis galime apsipirkti ar pasiekti bibliotekas ir duomenų bazes, esančias bet kurioje pasaulio vietoje. Galime netgi išsirinkti pageidaujamą vaizdajuostę arba įsigyti tokią skalbimo mašiną, kuri sugedusi pati susisiekia su remonto dirbtuvėmis – anksčiau nei jos šeimininkas sužino apie gedimą! Ir visa tai galima padaryti naudojantis ta pačia telefono linija. Mes gyvename „informacijos supermagistralių" ir interaktyvios multimedijos – sąveikaujančios įvairialypės terpės – pasaulyje. Net jeigu kol kas ir nesinaudojame tokiomis ryšio priemonėmis, šie dalykai visiškai įmanomi.

Įvadas

Aprašytieji pavyzdžiai yra rezultatas ryšių revoliucijos, prasidėjusios nuo A. Dž. Belo (*Alexander James Bell*) telefono skambučio 1876 metais. Šiuo metu prie šios srities pažangos prisidėjo ir palydovinis bei radijo ryšiai, kurių dėka galime akimirksniu gauti informaciją iš tolimiausių planetos kampelių.

Šiame skyriuje atsakysime į klausimą: kokiu būdu tiek daug informacijos gali būti taip paprastai perduodama? Tačiau prieš tai būtina išsiaiškinti kai kuriuos svarbius radijo ir telefono ryšio aspektus.

1 RADIJO RYŠYS

Prisiminkite:

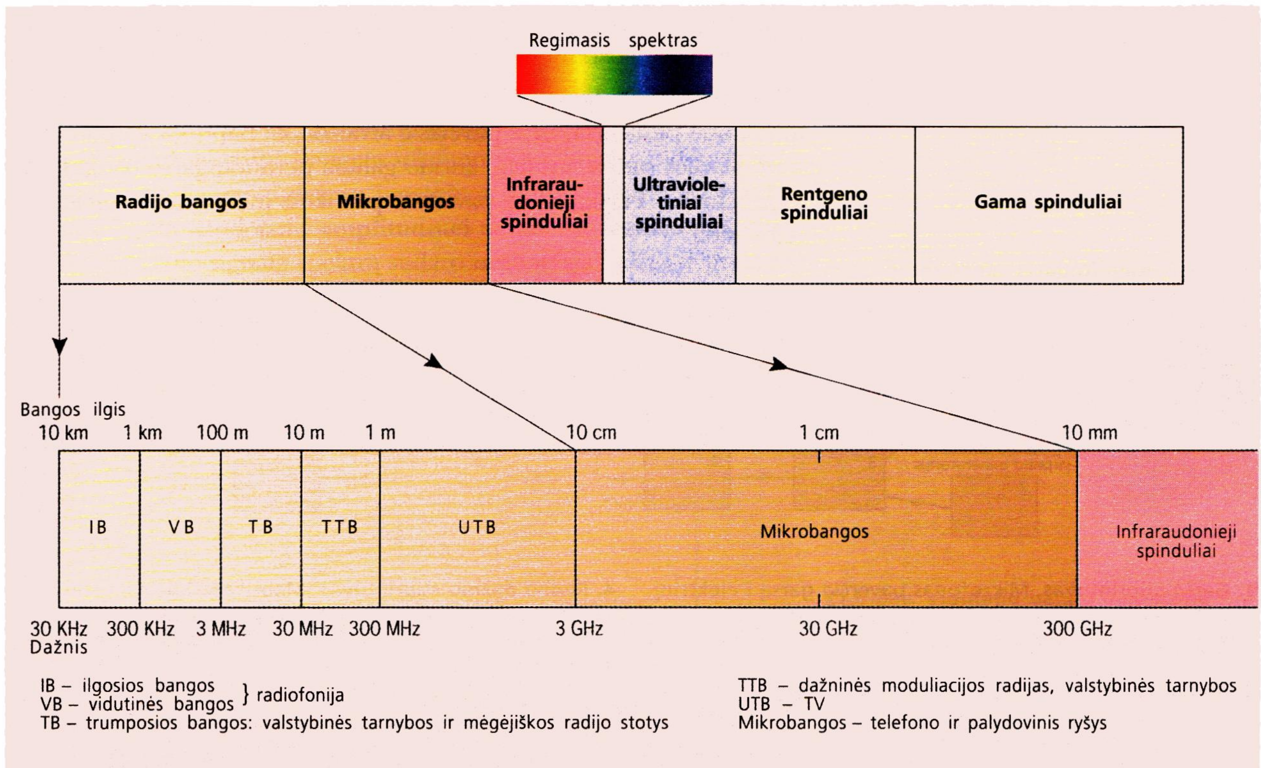
kilohercas = 10^3 Hz

megahercas = 10^6 Hz

Garsas yra labai patogi žmonių bendravimo priemonė. Gamta mums suteikė biologinius garso perdavimo ir priėmimo įtaisus – balsą ir ausis. Aišku, šie įtaisai nėra tobuli: balsu perduotas garsas netoli tenusklinda, o kai keletas žmonių bando „perdavinėti" vienu metu, „imtuvui" keblu atsirinkti gautus pranešimus.

Radijo bangos neturi pirmosios biologinio „siųstuvo" ydos – jos gali daug toliau perduoti garsą (ar bet kokią kitą siunčiamą informaciją) elektromagnetinių bangų pavidalu vos ne akimirksniu – jų greitis vakuume siekia 3×10^8 metrų per sekundę. 21.1 paveiksle parodyta, kurioje elektromagnetinio spektro vietoje yra radijo bangos; jame taip pat atsispindi kai kurie **radijo spektro** ypatumai.

Radijo bangų dažniai užima platų diapazoną elektromagnetiniame spektre: nuo dešimčių kilohercų iki tūkstančių megahercų. Tuo tarpu



21.1 pav. **Radijo bangų diapazonas elektromagnetiniame spektre. Nurodyti radijo bangų dažniai ir pagrindiniai radiofonijos, valstybinių tarnybų, televizijos ir palydovinių ryšių dažnių diapazonai**

garso bangos, kurias girdime per radijo imtuvą ar telefoną, turi būti žmogaus girdimų dažnių srityje, t. y. nuo maždaug 20 Hz iki 20 000 hz.

Taigi radijo bangų dažniai gerokai skiriasi (yra aukštesni) nuo garso informacijos, kurią tos bangos perneša, dažnio.

Siunčiamasis signalas

Radijo ryšio sistema gali perduoti skirtingų rūšių informaciją, kuri gali būti garsas, vaizdas ar įvairiai pateikti duomenys. Tačiau prieš nagrinėdami priimamo signalo formą, išsiaiškinkime, iš ko tas signalas sudarytas.

Siunčiamasis signalas sudarytas iš dviejų – vienas jų yra pastovaus **dažnio** ir pastovios **amplitudės** radijo signalas, kuris dažniausiai vadinamas **nešančiąja banga**; kitas yra **informacijos signalas**. Priešingai nei nešančioji banga, informacijos signalas nuolat kinta, jis gali visiškai nutrūkti ir po to vėl atsirasti – priklausomai nuo to, kaip kinta informacija. Siunčiamasis signalas – tai informacijos signalas drauge su nešančiąja banga; jų susiejimas vadinamas **moduliacija**.

Moduliacija

Siunčiamąjį signalą galima moduliuoti įvairiais būdais. Paprasčiausias būdas, kuriuo galima perduoti nesudėtingai, pavyzdžiui, Morzės (*Morse*) abėcėle, užkoduotą informaciją, yra tiesiog įjungti ir išjungti radijo signalą atitinkamais laiko momentais. Ilgesnis ar trumpesnis signalas imtuve interpretuojamas kaip taškas ar brūkšnys.

Norint perduoti sudėtingesnę garsinę informaciją, pavyzdžiui, kalbą arba muziką, tenka naudoti sudėtingesnius moduliacijos metodus. Radijo transliacijai naudojami du pagrindiniai moduliacijos būdai: **amplitudinė** moduliacija (AM) ir **dažninė** moduliacija (DM).

?

A Naudodamiesi lygtimi greitis = dažnis × bangos ilgis,

a) apskaičiuokite pateiktų dažnių radijo bangų ilgius: (i) 200 kHz, (ii) 1 Mhz, (iii) 100 MHz, (iv) 500 MHz, (v) 10GHz.

b) apskaičiuokite pateiktų bangos ilgių radijo signalų dažnį: (i) 200 m, (ii) 80 m, (iii) 2m , (iv) 20 cm, (v) 10 mm.

✓

Ir garsas, ir radijo signalai sklinda kaip bangos (žr. 1-os d. 6 skyrių).

Kintamąją elektrinę įtampą, į kurią mikrofonas paverčia garsą, vadiname *garso signalu*: t. y. garso bangos turima informacija perduodama elektriniam signalui.

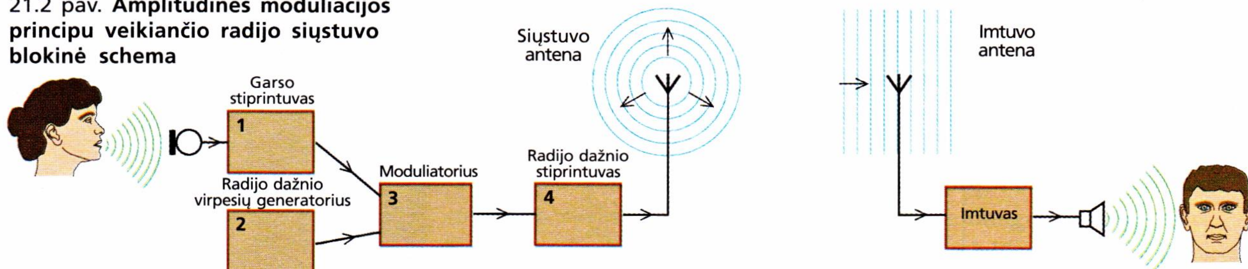
Panašiai radijo aparato priimtos radijo bangos paverčiamos signalu aparato grandinėse; šis signalas taip pat yra kintamoji elektrinė įtampa, kuri sukelia kintamąją srovę.

2 AMPLITUDINĖ MODULIACIJA

Žr. 1 klausimą.

Kai informacijos signalas sujungiamas su nešančiąja banga, pastarosios amplitudė pasikeičia. 21.2 paveiksle atvaizduota paprasta amplitudinės moduliacijos radijo siųstuvo, kuriuo galima perduoti garso bangas, blokinė schema. Perskaitykite paveiksle pateiktus įrašus, nurodančius signalo raidą.

21.2 pav. **Amplitudinės moduliacijos principu veikiančio radijo siųstuvo blokinė schema**

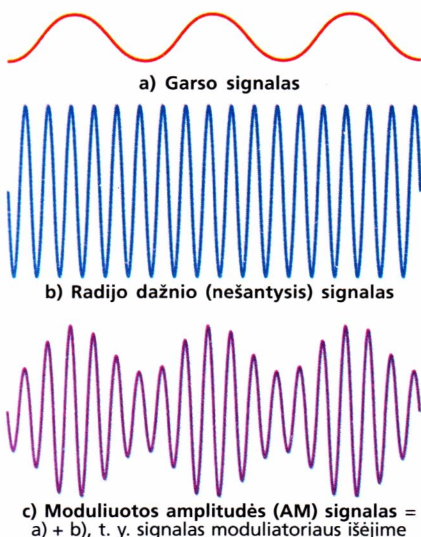


1. Garso stiprintuvas. Mikrofonas paverčia garsą į elektrinį signalą, kuris paprastai esti labai silpnas, todėl jam sustiprinti jungiamas garso stiprintuvas.

2. Radijo dažnio virpesių generatorius. Tai elektroninė grandinė, generuojanti „nešančiąją" bangą, kurios dažnis ir amplitudė yra pastovūs.

3. Moduliatorius (maišytuvas). Elektroninė grandinė, kuri susieja informacijos signalą, šiuo atveju – garso signalą – su nešančiąja banga.

4. Radijo dažnio stiprintuvas. Moduliatoriuje sukurtas signalas yra daug sudėtingesnis radijo dažnio signalas. Jis sustiprinamas ir siųstuvo antenos išspinduliuojamas elektromagnetinių bangų pavidalu.



21.3 pav. **Garso, radijo ir moduliuotos amplitudės (AM) signalų grafinis vaizdas**

Moduliatoriaus signalas

Kaip matyti 21.3 paveiksle, moduliatoriaus išėjime gautas signalas yra gana sudėtingas. Tai dviejų į moduliatorių patenkančių signalų mišinys. Kad būtų lengviau suprasti, kaip sukuriamas moduliatoriaus signalas, įsivaizduokite, kad siųstuvu perduodamas paprastas garso signalas – grynas *tik vieno* dažnio tonas. Tarkime, jo dažnis lygus f_o, o nešančiojo signalo radijo dažnį pavadinkime f_n. Palyginus 21.3a) ir b) paveikslus matyti, kad f_n yra daug didesnis už f_o.

Moduliaturius sumaišo šiuos signalus taip, kad išėjime gaunami dviejų skirtingų dažnių signalai, atitinkantys šių signalų sumą ir skirtumą (žr. 21.3):

$$(f_n + f_o) \text{ ir } (f_n - f_o).$$

Taigi iš viso mduliatoriaus išėjime yra keturių dažnių signalai:

$$f_0, f_n, (f_n + f_o) \text{ ir } (f_n - f_o).$$

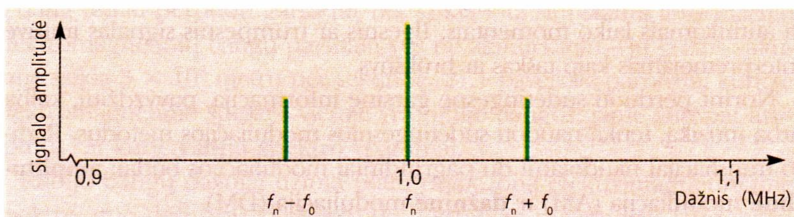
Trys signalai yra panašaus dažnio – visi jie vadinami radijo dažnio signalais. Ketvirtojo signalo dažnis yra f_o. Jis ypatingas tuo, jog tai garso signalas, kurio dažnis daug mažesnis už trijų kitų signalų dažnius. Paskutinė paprasto radijo siųstuvo grandis yra stiprintuvas. Tai radijo dažnio stiprintuvas, kuris smarkiai sustiprina radijo dažnio signalus. f_o dažnio signalą stiprintuvas atskiria (nufiltruoja), todėl jis nepasiekia imtuvo antenos.

Labai patogu šių trijų radijo signalų dažnius pavaizduoti grafiškai (žr. 21.4 pav.). Tai siųstuvo spinduliuojamų signalų dažnių spektras, kurį sudaro vienas nešantysis dažnis ir kiti du šalutiniais vadinami dažniai.

> **?**
> **B** Nešančioji banga, kurios dažnis 1 MHz, moduliuojama 10 kHz dažnio garso signalu. Kokių dažnių bangas sukuria šis moduliatorius?

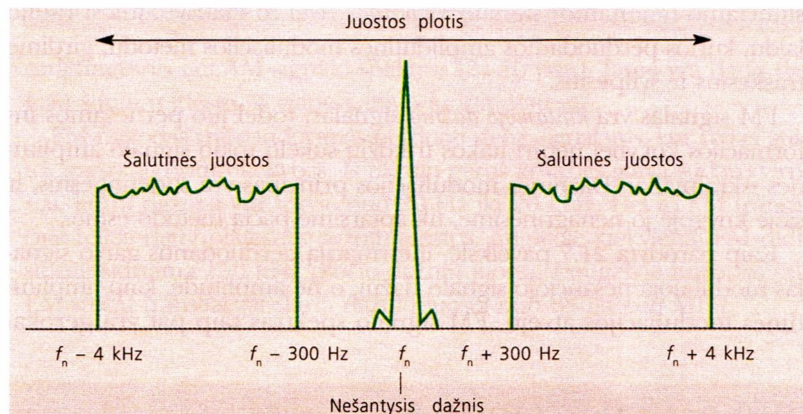
Žr. 11 klausimą.

21.4 pav. **Radijo siųstuvo, veikiančio amplitudinės moduliacijos principu, perduodamo signalo dažnių spektras**



Juostos plotis

Realiai radiofonijoje perduodamas garso signalas yra daug sudėtingesnis nei ką tik nagrinėtas vieno tono (dažnio) garsas. Realų garso signalą, ar tai būtų žmogaus kalba, ar muzikantų grupės atliekamas kūrinys, sudaro tam tikrų dažnių sritis. Daugelis telefono ryšio linijų ir radijo siųstuvų garsą perduoda **garso dažnių juostoje**, t. y. nuo 300 Hz iki 4 kHz. Kai visa ši juosta naudojama **amplitudinei** nešančiojo signalo moduliacijai, išėjime gauto signalo spektrą sudaro **nešantysis** dažnis ir greta jo dvi **šalutinės juostos**.



21.5 pav. **Vidutinių bangų diapazone veikiančios radijo stoties, perduodančios garso bangas nuo 300 Hz iki 4 kHz, dažnių spektras. Atkreipkite dėmesį į žemesnio ir aukštesnio dažnio šalutines juostas**

■ Žr. 2 klausimą.

Naudojant amplitudinės moduliacijos metodą, siunčiamąjį signalą sudaro visi 21.5 paveiksle pavaizduoti dažniai. Šalutinės juostos yra pati svarbiausia perduodamo signalo dalis, nes jose yra užkoduota perduodamoji informacija. (Būtų beprasmiška perduoti tik nešančiojo dažnio signalą!)

Tuo būdu vienas siunčiamasis signalas yra tam tikrų dažnių elektromagnetinių bangų rinkinys. Šie dažniai užima tam tikrą sritį elektromagnetiniame spektre. Ji vadinama **juostos pločiu**. Aukščiau aprašyto signalo juostos plotis yra 8 kHz. Tai reiškia, kad vienai radijo stočiai reikia 8 kHz dažnių srities. Atkreipkite dėmesį, kad:

juostos plotis = 2 × maksimalus garso dažnis.

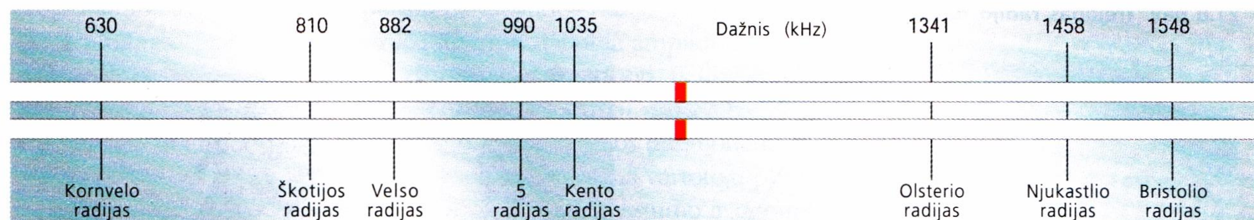
Pagal tarptautinius susitarimus radijo transliacijos stočių dažniai yra suskirstyti į tam tikrus diapazonus. Šiems diapazonams suteikti pavadinimai atitinkamai bangų ilgiams. Pavyzdžiui, „vidutinių bangų diapazonas“ arba „ilgųjų bangų diapazonas“. Vidutinių bangų diapazonas užima dažnių sritį nuo 500 kHz iki 1,6 MHz.

Kiekvienai radijo stočiai skiriama ne 8 kHz, o 10 kHz dažnių juosta, kad radijo stočių siunčiami radijo signalų dažniai nepersiklotų. Dėl to jos gali veikti viena kitai netrukdydamos.

?
C Koks yra tekste aprašytos vidutinių bangų juostos plotis?

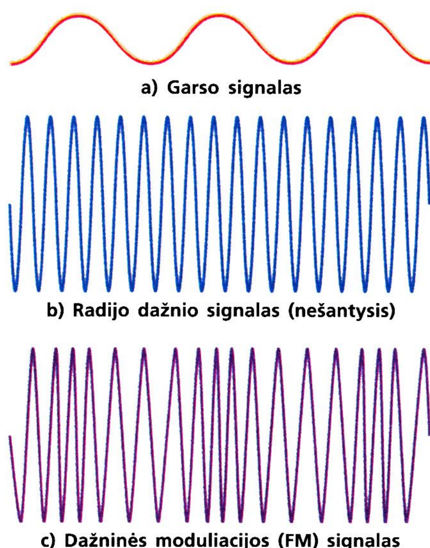
?
D Kiek daugiausiai radijo stočių viena kitai netrukdydamos gali veikti vidutinių bangų diapazone, jei kiekvienai radijo stočiai skiriama 10 kHz juosta?

21.6 pav. **Kai kurių D. Britanijos vidutinių bangų radijo stočių nešantieji dažniai**



3 DAŽNINĖ MODULIACIJA DM (FM)

Dar vienas paplitęs garso signalo moduliacijos būdas yra dažninė moduliacija. Tokiu metodu moduliuoto signalo kokybė yra kur kas geresnė nei amplitudinės moduliacijos būdu pakeisto signalo, nes AM signalą labai lengvai iškraipo trikdžiai, tuo tarpu FM signalo šie trikdžiai beveik neveikia.



21.7 pav. **Garso, radijo ir dažninės moduliacijos signalų grafinis vaizdas**

(Kadangi daugelyje radijo imtuvų dažninės moduliacijos diapazonai paprastai žymimi angliškai FM (**f**requency **m**odulation), o ne lietuviškai DM (**d**ažninė **m**oduliacija), tai naudosimės angliškuoju žymėjimo būdu.)

Trikdžiai yra atsitiktiniai signalai, kurie gali būti iš įvairių šaltinių. Pirmiausia tokie visada atsiranda elektrinėse grandinėse. Kita grupė yra atmosferos trikdžiai, kuriuos užregistruoja imtuvo radijo antena. Trikdžius taip pat generuoja elektros įrenginiai, pavyzdžiui, elektriniai grąžtai ar dulkių siurbliai.

Bet koks trikdžių šaltinis yra signalas, kuris visada sąveikauja su siunčiamo (gaunamo) signalo *amplitude*. Dėl to klausydamiesi radijo laidų, kurios perduodamos amplidutinės moduliacijos metodu, girdime traškesius ir švilpesius.

FM signalas yra *kintamojo dažnio* signalas, todėl juo pernešamos informacijos kokybei neturi įtakos trikdžių sukelti tokio signalo amplitudės iškraipymai. Dažninės moduliacijos principas yra sudėtingesnis, ir šioje knygoje jo nenagrinėsime, tik aptarsime pačią metodo esmę.

Kaip parodyta 21.7 paveiksle, informaciją perduodantis garso signalas moduliuoja nešančiojo signalo dažnį, o ne amplitudę, kaip amplitudinės moduliacijos atveju. FM signalo spektras taip pat yra gerokai

RADIJO BANGŲ SKLIDIMAS

Radijo bangos sklinda šviesos greičiu. Kosminio laivo *Voyager* signalas, pasiųstas iš Saulės sistemos pakraščio už 5000 milijonų kilometrų nuo Žemės, tiesia linija sklinda vos keturias su puse valandos. Tačiau ties Žemės paviršiumi sklindančių radijo bangų sklidimo nuotolį bei trajektoriją veikia pati planeta bei viršutiniai atmosferos sluoksniai, kurių būklė kinta priklausomai nuo paros laiko, metų sezono ir Saulės aktyvumo.

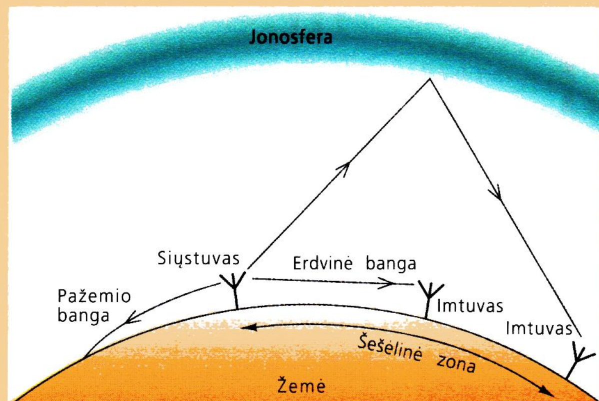
Žemojo dažnio radijo bangos sklinda ties Žemės paviršiumi. Toks sklidimas vadinamas **paviršiniu, arba pažeminiu, bangų sklidimu.** Vidutinio diapazono bangos tokiu būdu dieną nusklinda apie 200 km. Kai bangų dažnis yra didesnis nei 2 MHz, jų amplitudė tolstant nuo siųstuvo greitai silpnėja.

Radijo bangos, kurių dažniai yra srityje tarp 2 MHz ir 20 MHz, labai gerai *atsispindi nuo jonosferos*. Jonosfera – tai jonizuotų atmosferos molekulių sluoksnis, kuris prasideda apie 40 km virš planetos paviršiaus ir tęsiasi bemaž iki 300 km. Šiuo būdu sklindančios radijo bangos vienu „šuoliu" nuskrieja apie 4000 km, ir gali keliais šuoliais lengvai apkeliauti aplink Žemę. Tačiau taip sklindančios bangos tarytum „peršoka" didelius planetos paviršiaus plotus, todėl tose srityse girdimas labai silpnas signalas.

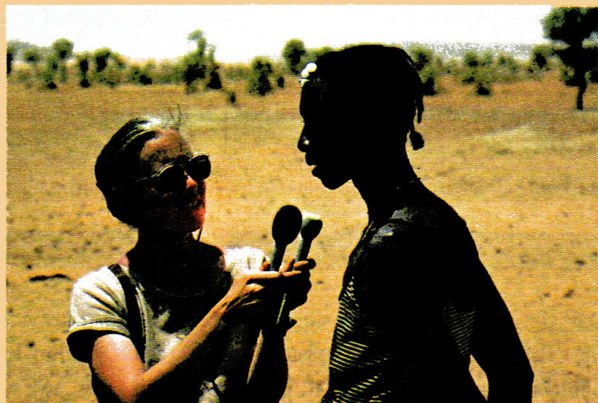
Jonosferinio atspindžio būdu sklindančių radijo bangų dažnis priklauso nuo Saulės dėmių skaičiaus, kuris atitinka Saulės aktyvumo 11 metų periodo ciklą. Kuo didesnis Saulės aktyvumas, tuo jonosferoje susidaro daugiau jonizuotų dalelių, tuo didesnio dažnio radijo bangas ji gali atspindėti. Didelio Saulės aktyvumo laikotarpiu atspindžio nuo jonosferos būdu galima perduoti iki 30 MHz dažnio radijo bangas.

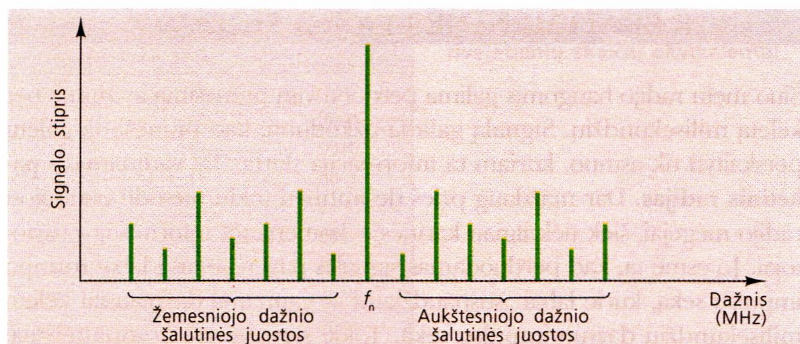
Kai radijo bangų dažnis didesnis nei 30 MHz, jos sklinda **tiesiomis linijomis**, t. y. bangos pasiekia tik tas vietas, kurios yra tiesiogiai „matomos" iš siųstuvo antenos. Ir Žemės, ir palydovinės televizijos stotys transliacijai naudoja kaip tik tokias bangas. Jų sklidimo nuotolį riboja planetos paviršiaus išgaubtumas. Jonosfera šių dažnių diapazone bangų sklidimui beveik neturi įtakos.

21.8 pav. **Trejopas radijo bangų sklidimo būdas**



21.9 pav. **Radijas suteikia mums galimybę išgirsti žmonių balsus iš tolimiausių planetos kampelių**





21.10 pav. **Dažninės moduliacijos signalo dažnių spektras. Atkreipkite dėmesį į didesnį nei AM atveju šalutinių juostų skaičių**

■ Žr. 3 klausimą.

sudėtingesnis nei AM signalo spektras (21.10 pav.). Jame yra daug daugiau šoninių juostų, o vieno kanalo juosta platesnė.

FM metodas yra naudojamas perduoti stereosignalams, kur reikia aukštos garso atkūrimo kokybės. Iš tikrųjų geros kokybės garsą sudaro virpesiai, kurių dažniai yra srityje nuo 20 Hz iki 20 kHz. Dėl to FM transliacijai reikia daug platesnės dažnių juostos. Anglijoje kiekvienai FM radijo stočiai skiriama 150 kHz pločio dažnių juosta. Daugelyje Europos šalių FM stočių transliacijai skirta dažnių juosta nuo 88 iki 108 MHz.

4 AM IR FM – ANALOGINIAI MODULIACIJOS METODAI

?

E a) Kodėl vidutinių bangų diapazone neperduodami stereosignalai?

b) Kiek daugiausiai stereofoninių stočių gali naudoti dažninės moduliacijos juostą transliacijai?

c) Kodėl pastaruoju metu radijo stotys daugiausia veikia dažninės moduliacijos diapazone?

Radijo ir telefono sistemos

Iki šiol daugiausiai dėmesio skyrėme radijo signalams. Telefonu perduodamus signalus taip pat galima moduliuoti abiem aptartais metodais. Dėl to vienu telefono kabeliu galima pasiųsti daug signalų. Šiuo metu naudojamais optiniais šviesolaidžiais signalai siunčiami atitinkamose optinių dažnių juostose, panašiai kaip ir radijo signalai.

Amplitudinė ir dažninė moduliacija yra **analoginiai** moduliacijos metodai. Sąvoka „analoginis“ reiškia, kad tarp informacijos signalo ir perduodamo elektroninio signalo yra tiesioginis ryšys. Pavyzdžiui, radijo transliacijoje garso stipris ir tonas naudojami perduodamo signalo *amplitudei* arba *dažniui* pakeisti. Be to, analoginiai signalai kinta tolygiai, tam tikrame diapazone įgaudami visas įmanomas dažnio arba amplitudės vertes.

Kaip jau minėjome, tokie signalai užima nedidelį dažnių diapazoną, taigi mažą ir elektromagnetinio spektro dalį. Ir AM, ir FM signalai sklinda tik nedideliu atstumu.

AM ir FM apribojimai

Išsiaiškinome, kad AM ir FM plačiai naudojamos radijo ir telefono ryšio grandinėse. Kai kurios televizijos sistemos naudoja amplidutinę moduliaciją vaizdo, o dažninę – garso informacijai perduoti. Iš tikrųjų AM ir FM yra veiksmingi ryšio metodai. Tačiau pastaruoju metu labai išaugus perduodamos informacijos kiekiui, o komunikacijos priemonėms tapus gerokai sudėtingesnėms, šie metodai jau netenkina vartotojų poreikių. Visų pirma, jais neįmanoma pasiekti techninio lankstumo ir duomenų perdavimo patikimumo. Kitas trūkumas yra tas, kad AM ir FM signalai yra atviri: išspinduliuotus siųstuvo gali išgirsti bet kas, turintis suderintą imtuvą. Be to, abi šios duomenų perdavimo sistemos veikia „realiu laiku“, t. y. signalas gali būti priimamas tik jo perdavimo metu. Radijo bangų sritis beveik perpildyta, taigi signalo perdavimo galimybės vis labiau komplikuojasi. Dėl to vis sparčiau diegiami skaitmeniniai komunikacijos metodai.



21.11 pav. **Ekrane galime matyti žmogų, su kuriuo kalbame**

5 SKAITMENINĖS RYŠIO SISTEMOS

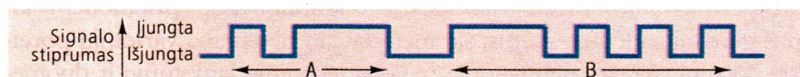
Šiuo metu radijo bangomis galima perduoti visą pranešimą ar žinutę per keletą milisekundžių. Signalą galima užkoduoti, kad pranešimą galėtų perskaityti tik asmuo, kuriam ta informacija skirta. Tai vadinamasis **paketinis radijas**. Dar maždaug prieš dešimtmetį tokiu metodu naudojosi radijo mėgėjai, šiek tiek ilgiau karinės ir komercinės informacijos vartotojai. Jo esmė ta, kad perduodamas signalas paverčiamas į labai trumpų impulsų seką, kurie labai „suspaudžiami" – gaunama dažniausiai keleto milisekundžių dažnio impulsų seka. Tokie signalai yra kompiuteriniai pranešimai, kuriuos siuntėjo kompiuteris užkoduoja gavėjui žinomu būdu, o gavėjo kompiuteris dekoduoja.

Prie asmeninių kompiuterių prijungus videofonus žmonės turi galimybę tiesiogiai bendrauti per atstumą. Galima surengti videokonferenciją, kurios visi dalyviai matomi vaizduoklio ekrane. Taip pat galima nusiųsti bet kokią rašytinę ar grafinę informaciją iš vieno kompiuterio į kitą.

Tai tik keletas galimybių, kurias suteikia **skaitmeninės sistemos**. Šiose sistemose komunikacijų technologija labai panaši į pirmą panaudotą informacijos perdavimo elektros impulsais būdą, t. y. Morzės kodą. Perduodant informaciją Morzės metodu, ši užkoduojama trumpų ir ilgų impulsų sekomis. Impulsas sukuriamas tiesiog įjungiant trumpam laikui signalą. Morzės kodavimo sistemoje ilgi impulsai („brūkšniai") yra tris kartus ilgesni nei trumpi („taškai"). Šių impulsų deriniais užkoduojamos raidės, o sujungus tuos derinius gaunami žodžiai ir sakiniai. Samuelis Morzė sugalvojo šį kodą, norėdamas pademonstruoti laidinio telegrafo, išrasto 1837 metais, privalumus. Taip užkoduotus pranešimus buvo galima perduoti labai dideliais atstumais – pirmasis kabelis per Atlantą, kuriuo buvo siunčiami Morzės metodu užkoduoti pranešimai, pradėjo veikti 1858 metais. Tuo tarpu pirmoji telefono linija per Atlantą buvo nutiesta tik 1956 metais! Kuo gi ypatingas Morzės kodas, kad jis patikimai tarnavo jau praeitame šimtmetyje, o telefono ryšį pavyko sukurti beveik po šimto metų? Taip yra todėl, kad skaitmeniniai signalai yra ne tokie jautrūs elektriniams trikdžiams, gali nusklisti didelius nuotolius ir galų gale detektuojami. Be to, tokie signalai užima siauresnę dažnių juostą, todėl tą patį diapazoną gali naudoti daugiau radiofono stočių.

Kas yra skaitmeninis kodas?

Kaip išsiaiškinome, Morzės kodas (21.12 pav.) yra paprasčiausias skaitmeninis kodas. Elektroniniai skaitmeniniai kodai ir skaitmeniniai signalai taip pat yra labai paprasti, nes visi jie turi tik dvi reikšmes: „įjungta" arba „išjungta". Patį skaitmeninį signalą sudaro „įjungtų" ir „išjungtų" impulsų sekos. Yra sutarta tokiems impulsams suteikti vertes „0", kai „išjungta", ir „1", kai „įjungta".



21.12 pav. **Raidžių A (. –) irB (– . . .) Morzės kodai**

Dvejetainis kodas

Paprastas, tačiau plačiai paplitęs kodas yra **dvejetainis (binarinis) kodas**. Dvejetainė skaičių sistema grindžiama dviem skaičiais: 0 ir 1 (panašiai kaip dešimtainę skaičių sistemą sudaro skaičiai nuo 0 iki 9). 21.1 lentelėje parodyta, kaip atrodo dešimtainių skaičių nuo 1 iki 15 atitikmenys dvejetainėje sistemoje.

Dešimtainis	Dvejetainis	4 bitų dvejetainis
0	0	0000
1	1	0001
2	10	0010
3	11	0011
4	100	0100
5	101	0101
6	110	0110
7	111	0111
8	1000	1000
9	1001	1001
10	1010	1010
11	1011	1011
12	1100	1100
13	1101	1101
14	1110	1110
15	1111	1111

21.1 lentelė. **Dešimtainių ir dvejetainių skaičių ekvivalentai**

Trečiajame lentelės stulpelyje dvejetainiai skaičiai pateikti kaip „keturių bitų“ dvejetainiai žodžiai. Kiekvienas dvejetainio skaičiaus skaitmuo yra vadinamas **bitu** (pagal angliškų žodžių raides „**bi**nary digi**t**“ – dvejetainis skaitmuo). Nuliai kaip papildomi bitai yra prirašomi iš kairės, kad sudarytų pilną žodį. Visi skaitmeniniai signalai sudaromi iš keturių bitų arba keturiems bitams kartotinio skaičiaus žodžių: 8 bitų (dažnai vadinamu **baitu** (**byte**), 16 bitų, 32 bitų ar netgi 64 bitų.

Skaitmeniniai signalai

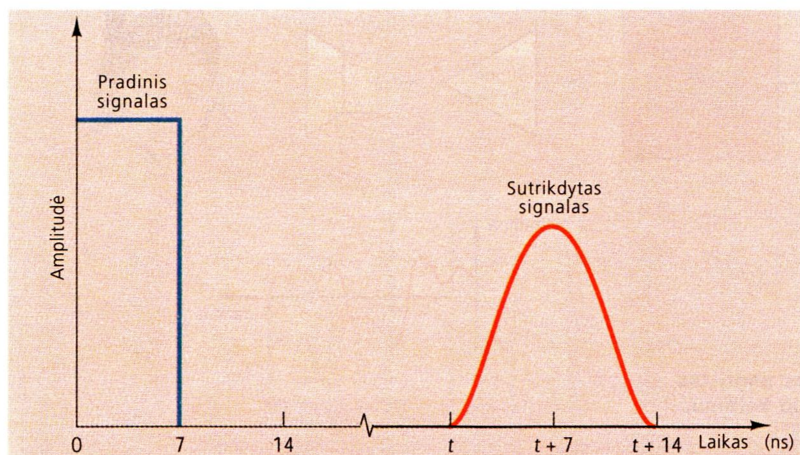
Vaizdai ir garsai yra paverčiami į **skaitmeninius signalus (kodus)**, kurie perduodami kaip impulsai. Tada atitinkami imtuvo įrenginiai impulsus vėl paverčia į pradinius vaizdus ir garsus. Panagrinėkime išsamiau šį procesą.

Skaitmeninius signalus lengva priimti. Vienintelis dalykas, ką turi mokėti imtuvas, tai užregistruoti, ar impulsas yra įjungtas, ar išjungtas, kitais žodžiais tariant, ar signalo lygis yra aukštas, ar žemas. Radijo bangomis ar telefono linijomis perduodami skaitmeniniai signalai kinta. 21.13 paveiksle parodyta, kaip pasikeičia pradinis taisyklingos formos impulsas, nusklidęs tam tikrą atstumą. Tačiau net ir šiuo atveju, jei tik imtuvas įstengia atskirti žemą signalo lygį nuo aukšto, tai pradinis signalas gali būti tiksliai atkurtas. Analoginiams signalams nebūdingi staigūs signalo lygio „aukštas–žemas“ šuoliai. Jie kinta tolygiai, todėl lengvai sutrikdomi, t. y. jais sklindanti informacija iškraipoma daug trumpesniame nuotolyje.

?

F a) Kiek bitų reikia, norint nurodytus dešimtainius skaičius užrašyti dvejetaine sistema? (i) 16, (ii) 32, (iii) 64.

b) Kiekvienas a) dalyje pateiktas dešimtainis skaičius gali būti išreikštas 2^n, kur n yra sveikasis skaičius. Įrodykite, kad visi atsakymai a) gali būti parašyti kaip (n + 1).



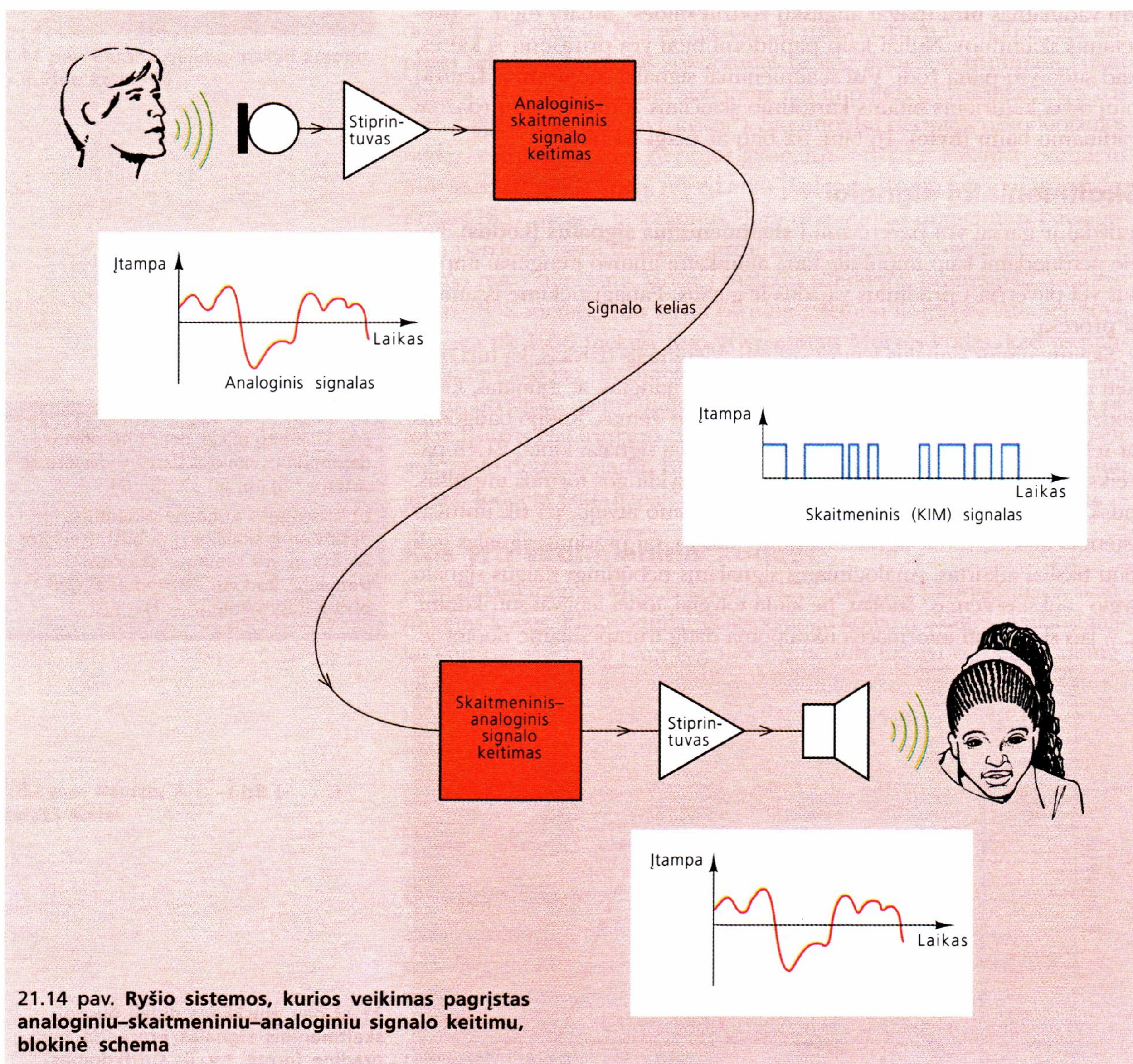
21.13 pav. **Nusklidęs didelį nuotolį skaitmeninis signalas praranda savo pradinę formą, t.y. jis sutrikdomas**

6 SIGNALO KEITIMAS

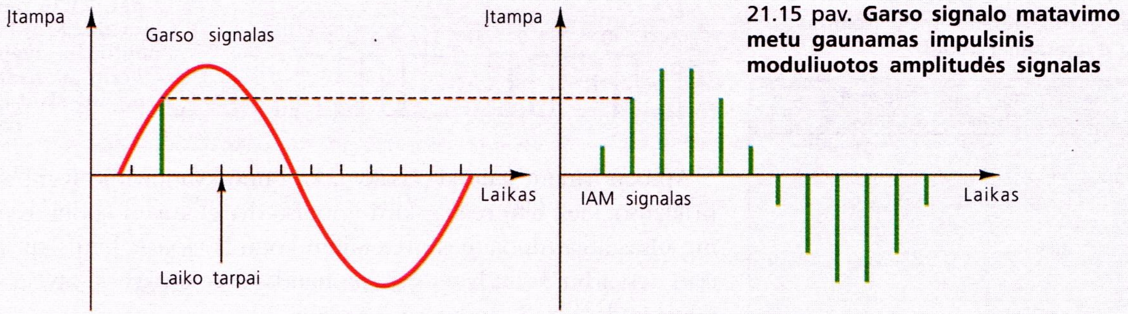
Daugelis perduodamų signalų paprastai yra analoginiai. Kasdieniniai pavyzdžiai yra kalba ir muzika – tai tokie signalai, kurie kinta laike tolydžiai (nenutrūkstamai). Norint pasinaudoti skaitmeninių sistemų privalumais, pirmiausiai reikia paversti analoginius signalus skaitmeniniais. Šis procesas vadinamas **analoginiu–skaitmeniniu keitimu**. Tada skaitmeninis signalas yra perduodamas, o imtuve jis vėl paverčiamas analoginiu signalu. Šis procesas yra vadinamas **skaitmeniniu–analoginiu keitimu**. Idealiu atveju imtuvo išėjime gautas analoginis signalas turi būti toks pat, koks buvo siųstuvo įėjime.

Kodinė impulsinė moduliacija (KIM)

Signalus į skaitmeninius impulsus paversti galima keliais būdais. Panagrinėsime vieną jų, kuris vadinamas **kodine impulsine moduliacija** (KIM). Šis metodas dažniausiai naudojamas komunikacijos sistemose. Iš pradžių išsiaiškinkime bendrą signalo perdavimo telefono linija schemą, kuri pateikta 21.14 pav.



21.14 pav. Ryšio sistemos, kurios veikimas pagrįstas analoginiu–skaitmeniniu–analoginiu signalo keitimu, blokinė schema



21.15 pav. **Garso signalo matavimo metu gaunamas impulsinis moduliuotos amplitudės signalas**

Analoginis–skaitmeninis keitimas

Pirmiausia mikrofonas pakeičia garsą į elektroninį analoginį signalą, kurio įtampos amplitudė ir dažnis kinta laike. Toks analoginis signalas pasiekia vietinę telefono stotį, kur pakeičiamas į skaitmeninį signalą naudojant KIM metodą.

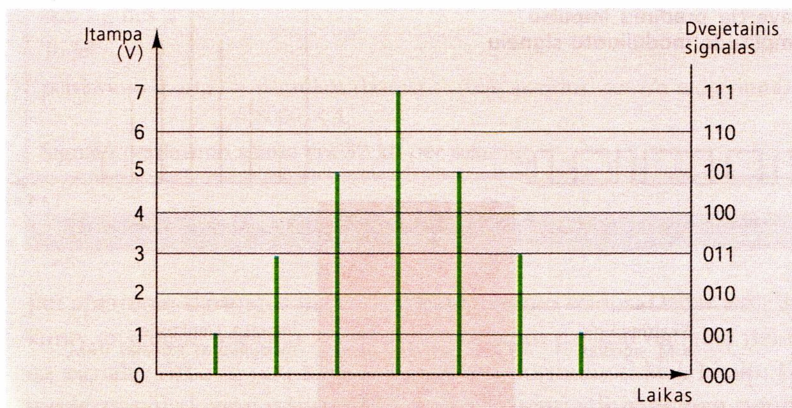
KIM yra kelių pakopų. Iš pradžių analoginio signalo amplitudė (įtampa) daug kartų išmatuojama labai mažais laiko tarpais. Šis procesas vadinamas **diskretizacija** arba tiesiog **imčių parinkimu**. Tipinio garsinio dažnio analoginio signalo matavimas atliekamas kas 125 μs. Tai reiškia, kad toks signalas išmatuojamas 8000 kartų per sekundę. Matavimo rezultatas – labai trumpi impulsai, kurių visumą atkartoja pradinio analoginio garso signalo formą (21.15 pav.). Impulsų skaičius per sekundę vadinamas **išrankos dažniu**. Šioje pakopoje gautas signalas vadinamas **impulso amplitude moduliuotu** (IAM) signalu.

Per kitą pakopą kintamos amplitudės impulsai paverčiami dvejetainiu kodu. Tai daroma taip. Didžiausia analoginio signalo įtampos vertė, sąlygojama naudojamo mikrofono ir jo stiprintuvo, sudalijama į tam tikrą skaičių lygių. Šis procesas vadinamas **kvantavimu**, o skirtingos amplitudės vertės – **kvantavimo lygiais**. Kiekvienam kvantavimo lygiui priskiriamas dvejetainis skaičius. Pavyzdžiui, jei maksimali analoginio signalo įtampa yra 1 V, tai 1 V bus aukščiausiasis lygis. Jei naudojama 16 kvantavimo lygių, tai po nulio pirmasis lygis bus lygus 1/16 volto.

Tada kiekvienas išmatuotas impulsas yra palyginamas su šiais lygiais ir kiekvienam impulsui priskiriamas artimiausias jo amplitudę atitinkantis kvantavimo lygis. Tokiu būdu kiekvienam IAM impulsui suteikiamas skaitmeninis kodas, t.y. dvejetainis skaičius (21.16 pav.). Dvejetainio skaičiaus dydis, t.y. jį sudarančių bitų skaičius, priklauso nuo to, kiek yra kvantavimo lygių. Jeigu iš viso yra 8 lygiai (įskaitant ir nulinį lygį), kaip pavaizduota 21.16 pav., tai analoginio signalo impulsų amplitudei užkoduoti pakanka dvejetainio skaičiaus, sudaryto iš trijų bitų.

Analoginio signalo matavimo dažnį reikia lyginti su didžiausiuoju perduodamuoju dažniu. Pavyzdžiui, perdavimo skaitmeninėmis telefono linijomis normos praktiniais sumetimais yra tokios pačios kaip ir AM linijomis. Pagal šias normas didžiausias perduodamas garso dažnis yra 4 kHz. Taigi 8000 kartų per sekundę tėra vos du kartus daugiau už didžiausią dažnį.

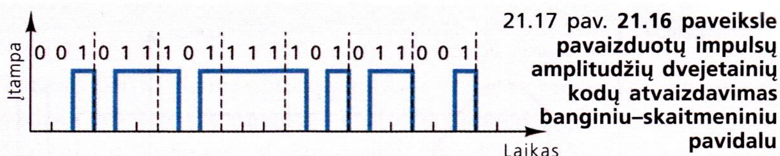
■ Žr. 4, 5 ir 6 klausimus.



21.16 pav. **Impulsų amplitudė paverčiama dvejetainiu signalu**

21.2 lentelė. **21.15 paveiksle pavaizduoto signalo imčių įtampos lygių dvejetainiai kodai**

Impulsas	Įtampos lygis	Dvejetainis kodas
1	1	001
2	3	011
3	5	101
4	7	111
5	5	101
6	3	011
7	1	001



21.17 pav. **21.16 paveiksle pavaizduotų impulsų amplitudžių dvejetainių kodų atvaizdavimas banginiu–skaitmeniniu pavidalu**

Apibendrinant galima pasakyti, kad nuo kvantavimo lygių skaičiaus priklauso, kiek bitų reikia skirti impulso dvejetainiam kodui. Kiekvienas impulsas atvaizduojamas dvejetainiu kodu iš *vienodo* bitų skaičiaus. Tačiau nesvarbu, kelių lygių sistema naudojama konkrečiu atveju – dvejetainis kodas visada vadinamas **žodžiu**.

Bet kuris dvejetainis kodas perduodamas nuoseklia seka, pradedant nuo vieneto. Jei skaitmeninį signalą įvestume į oscilografą, tai jo ekrane matytume vienodos amplitudės, tačiau skirtingos trukmės impulsų seką. Mūsų nagrinėjamo pavyzdžio atveju ta seka pavaizduota 21.17 paveiksle.

Konkretus dvejetainis skaičius užima tam tikros trukmės dalį impulsų sekoje. Dvejetainis nulis (0) atitinka žemą lygį – skaitmeninio signalo įtampa lygi 0 V, o dvejetainis vienetas (1) atitinka aukštą lygį – skaitmeninio signalo įtampa lygi tam tikrai vertei, kuri priklauso nuo maitinimo šaltinio (dažniausiai 5 V). Perduodamų impulsų trukmė priklauso nuo to, kiek vienetukų ir nuliukų seka vienas paskui kitą. Toks signalo sudarymo būdas vadinamas **kodine impulsine moduliacija** (KIM).

Telefoninio ryšio sistemose šie skaitmeniniai impulsai yra perduodami kabeliu. Jie gali būti paversti ir infraraudonųjų spindulių impulsais, kuriuos patogu perduoti šviesolaidžiais. Skaitmeninius impulsus galima perduoti netgi radijo bangomis – mikrobangų diapazone. Pavyzdžiui, *Voyager* zondo surinkta informacija į Žemę buvo atsiųsta kaip tik KIM formos signalais (žr. 140 p.).

G Kodėl norint paversti 16 kvantavimo lygių dvejetainiais kodais, reikia naudoti keturių bitų skaičiaus?

H Kodėl geriau perdavinėti vienodų, o ne skirtingų amplitudžių impulsus?

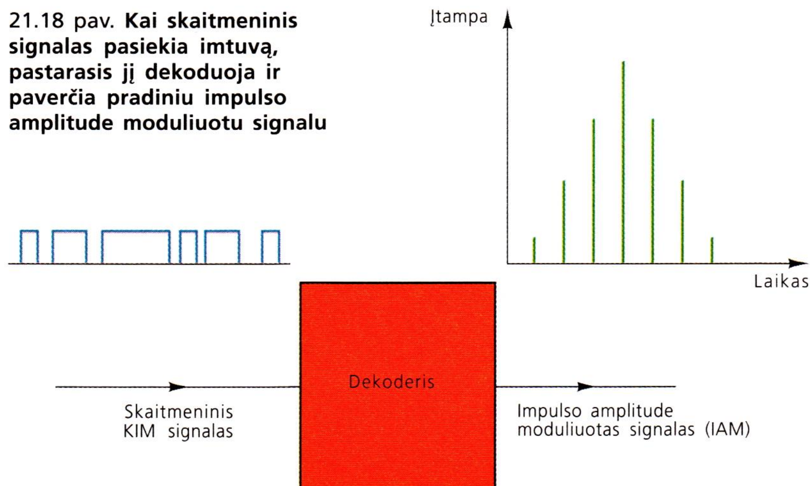
Skaitmeninis–analoginis keitimas

Imtuve informacija išskiriama priešinga tvarka. Gauto KIM signalo kiekvienas dvejetainis žodis dekoduojamas – paverčiamas atitinkamos amplitudės trumpu impulsu. Visus impulsus nuosekliai sujungus gaunamas analoginis signalas, kurio forma idealiu atveju turi būti tokia pat kaip ir siųstuvo įėjime. 21.18 paveiksle pavaizduota, kaip skaitmeninis signalas pakeičiamas į impulso amplitude moduliuotą (IAM) signalą. Tolesnės imtuvo grandys paverčia šį signalą analoginiu signalu.

I Impulsinė kodinė moduliacija naudojama ir skaitmeniniam garsinės informacijos įrašymui. Įrašant kompaktines plokšteles, dažnai vartojama 32 bitų kodų sistema. Kiek tokioje sistemoje yra kvantavimo lygių?

Pradinio signalo atkūrimo kokybė priklauso nuo analoginio signalo kvantavimo lygių skaičiaus, t. y. nuo padalijimų tankio. Kuo daugiau lygių, kuo

21.18 pav. **Kai skaitmeninis signalas pasiekia imtuvą, pastarasis jį dekoduoja ir paverčia pradiniu impulso amplitude moduliuotu signalu**



TELEFONO SISTEMŲ ATNAUJINIMAS

Telefono pokalbiai iš mūsų namų iki vietinės telefonų stoties paprastai perduodami variniais laidais. Šią sistemą būtų brangu pakeisti šviesolaidžiais. Daug paprasčiau atnaujinti telefono aparatus – šiuolaikiniai aparatai gali pokalbius paversti skaitmeniniais signalais, kurie sėkmingai sklinda variniais laidais. Svarbiausi tokios sistemos privalumai – didelis duomenų perdavimo patikimumas bei galimybė prijungti prie skaitmeninės informacijos srauto įvairių tipų įrenginius.

Ši sistema vadinama Visuotiniu skaitmeninio ryšio tinklu (ISDN – **I**ntegrated **D**igital **S**ervices **N**etwork). Jos dėka telefono ryšį galima panaudoti įvairiausiems tikslams. Skaitmeninio ryšio telefonas viena linija gali perduoti duomenis 144 kb · s^{-1} greičiu. Paprastai tokioje linijoje yra du kanalai, kurių perdavimo greičiai yra 64 kb · s^{-1}, o trečias 16 kb · s^{-1} greičio kanalas skiriamas informacijai perduoti. 64 kb kanalais perduodamas garsas, faksimilės ar kompiuteriniai duomenys.

Videofone vienas kanalas naudojamas balsui, o kitas – vaizdui perduoti. Tai tarsi dviejų linijų telefonas, kuris, aišku, ir kainuoja dvigubai brangiau. 16 kb kanalu dažnai sklinda telemetriniai duomenys. Tai gali būti duomenys iš įvairiausių buitinių matavimo prietaisų – tokių kaip elektros, dujų skaitikliai ar įvairūs kitokie pranešimai, kaip antai sugedusios skalbimo mašinos, minėtos šio skyriaus pradžioje, pranešimas ją aptarnaujančiam inžinieriui apie gedimą.

Įvairių taikymų galimybes riboja duomenų perdavimo greitis. Tobulėjant elektroninėms komunikacijos priemonėms, artimiausiu laiku galima tikėtis ir didesnio perdavimo greičio. Panašu, kad per keletą artimiausių metų telefono linijas papildys elektroninės grandinės, kurių pralaidumas padidės iki 100 Mb · s^{-1}.

arčiau jie vienas kito, tuo mažesnė paklaida daroma priskiriant impulsų amplitudei dvejetainį kodą. Tačiau kai daug lygių, dvejetainiams kodams reikia vis daugiau bitų. Norint perduoti ilgesnius dvejetainius kodus per tą patį laiką, tenka mažinti dvejetainio skaitmens (0 arba 1) impulso trukmę.

?

J 64 kbitų kanalas, naudojamas skaitmeninio tinklo linijose, leidžia perduoti tokios pačios kokybės garso signalą kaip ir šiame skyrelyje aprašytu atveju, t. y iki 3,4 kHz. Nurodykite keletą privalumų, kuriuos teikia didesnio perdavimo greičio ryšys.

Skaitmeniniai signalai ir bitų skaičius

Analoginiai signalai apibūdinami „dažnių juosta“; tai svarbus radijo stočių darbo parametras, kaip ir darbinio dažnio sąvoka. Siunčiant skaitmeninius signalus bet kuri sąvoka, susijusi su dažniu, neturi prasmės. Skaitmeniniai signalai apibūdinami bitų (dvejetainių skaitmenų) skaičiumi per sekundę.

Norint apskaičiuoti signalo perdavimo spartą bitais per sekundę, reikia žinoti signalo išrankos dažnį ir kvantavimo lygių skaičių. Išrankos dažnis yra matavimų skaičius per vieną sekundę. Lygių skaičius nusako dvejetainio kodo ilgį ir vienam matavimui skiriamą bitų skaičių.

Taigi perdavimo spartą galima apskaičiuoti taip:

(išrankos dažnis) × (bitų skaičius vienam matavimui)

Terpė, kuria signalai sklinda, riboja didžiausią galimą išrankos dažnį ir didžiausią perdavimo spartą. Tai išsamiau panagrinėsime 145 p.

PAVYZDYS

K Apskaičiuokite signalo, kurio išrankos dažnis yra 8 kHz, perdavimo spartą, jeigu naudojama 16 kvantavimo lygių.

A Išrankos dažnis yra 8000 per sekundę.

Norint 16 kvantavimo lygių užkoduoti dvejetaine sistemą reikia 4 bitų ilgio skaičių, nes $2^4 = 16$.

Todėl

perdavimo sparta = (išrankos dažnis) × (bitų skaičius vienam matavimui)
= 8000 × 4.

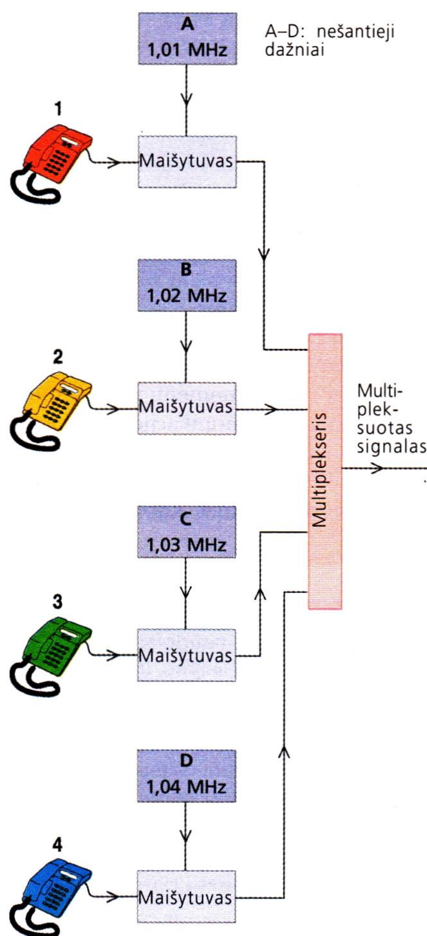
Signalo perdavimo sparta yra 32 kb per sekundę.

✓

Skirtingos radijo stotys gali transliuoti savo laidas tame pačiame diapazone, nes kiekvienos siųstuvo dažnis yra apibrėžtas. Siųstuvo dažniai paskirstyti taip, kad skirtingų stočių signalai nepersiklotų ir nesąveikautų tarpusavyje. AM transliacijai reikia 8 kHz dažnių juostos.

7 MULTIPLEKSAVIMAS

Jau aptarėme skirtingus informacijos perdavimo būdus. Dabar išsiaiškinkime: ar galima telefono kabeliu tuo pat metu pasiųsti daugiau nei vieną signalą? Arba tą patį klausimą galime suformuluoti kiek kitaip: kaip moderni palydovinė ryšių technika vienu metu gali patikimai sujungti



tūkstančius telefono abonentų? Tai įgyvendinama naudojant procesą, vadinama **multipleksavimu**. Tai kelių skirtingų signalų sujungimas ir siuntimas kartu.

Dažninis multipleksavimas

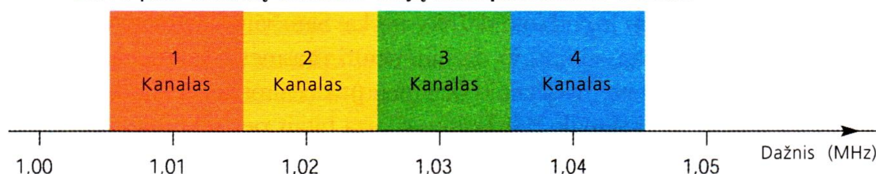
Analoginiai signalai gali būti sutelkti į junginį, vadinamą **grupe**. Analoginių signalų grupavimas vadinamas **dažniniu multipleksavimu (DM).**

Panagrinėkime, kaip keturios telefono linijos gali būti sujungtos į nedidelę grupę. Blokinė tokio sujungimo schema pateikta 21.19 pav. Prie kiekvienos iš keturių linijų yra po vieną telefoną, tačiau su vietine telefonų stotimi juos jungia tik vienas kabelis.

Kai skambinama kuriuo nors telefonu, jo signalo amplitudė moduliuojama nešančiuoju dažniu. Pirmojo telefono nešantysis dažnis yra 1,01 MHz, antrojo 1,02 MHz, trečiojo 1,03 MHz ir ketvirtojo 1,04 MHz. Šią grupę sudaro keturi kanalai, kiekvieno kanalo plotis 10 kHz. Multiplekseryje visi kanalai sujungiami į **multipleksinį signalą**.

Taip vienu laidu, jungiančiu telefonų stotis, sklinda dažnių nuo 1,00 MHz iki 1,05 MHz grupė. Kitoje telefonų stotyje vyksta priešingas procesas. Dažnių grupė nufiltruojama ir perduota informacija išskaidoma į atskirus, šiuo atveju – keturis kanalus. Kiekviename kanale yra demoduliacijos įrenginys, kuris atkuria pradinį telefonu pasiųstų duomenų pavidalą. (AM signalų demoduliacija aprašyta 169 p.)

21.19 pav. **Keturių telefono linijų multipleksavimo schema**



kilo = tūkstantis:
8 kHz = 8000 Hz
mikro = milijonoji dalis:
125 mikrosekundės (μs) = 0.000125 sekundės (s)

Žr. 6–10 klausimus. ■



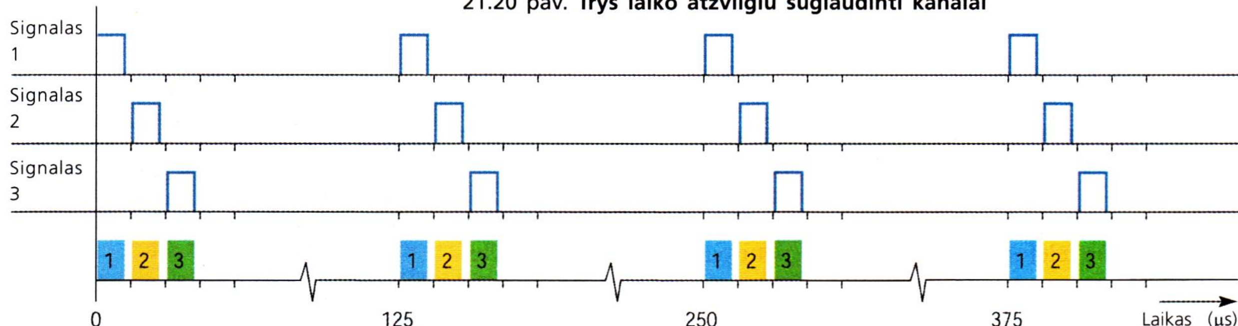
Laikinis multipleksavimas

Skaitmeniniai signalai gali būti multipleksuojami ir kitu būdu, vadinamu **laikiniu multipleksavimu** (LM).

Pavyzdyje, kuriame nagrinėjome kodinę impulso moduliaciją, analoginio signalo skleistas 8 kHz dažnis buvo nuskaitomas. Tai reiškia, kad signalas matuojamas kas 125 μs. Kadangi kiekviena imtis atvaizduojama 2–3 μs impulsu, tai tarp impulsų yra didesni nei 120 μs tarpai, kurių metu sistema neperduoda jokios informacijos. Arba, kitaip sakant, sistema tuščiai eikvoja laiką.

Laikinio multipleksavimo metu į laisvą vietą įterpiami kiti signalai. Praktiškai realizuotose sistemose susijungiama apie 30 kanalų. 21.20 paveiksle pavaizduota tik trijų kanalų multipleksavimo schema.

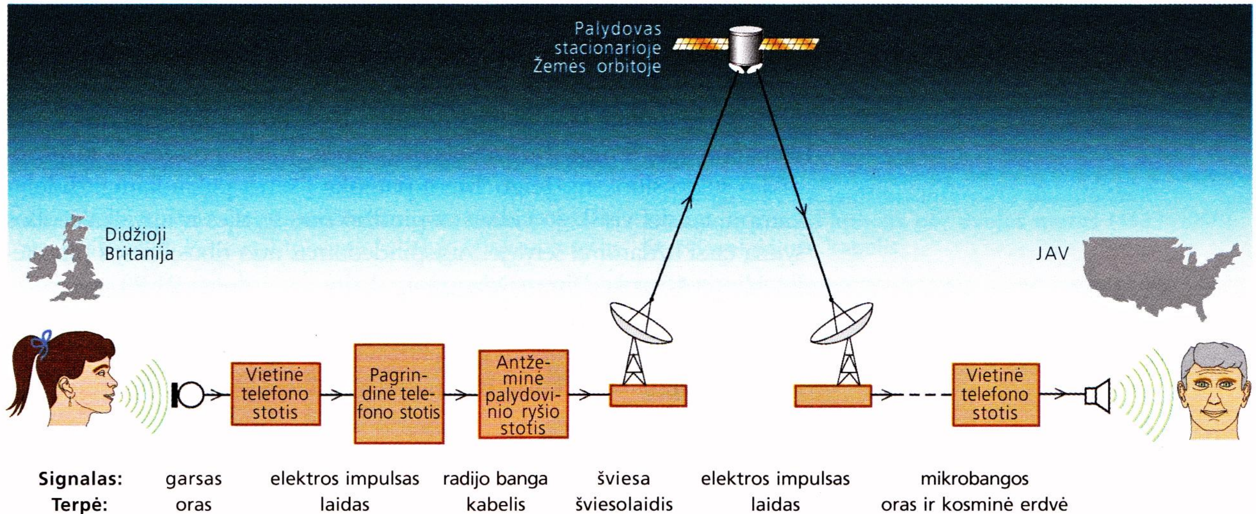
21.20 pav. **Trys laiko atžvilgiu suglaudinti kanalai**



8 KOKIA TERPE SKLINDA SIGNALAI

Radijo bangos gali sklisti ir tuščia erdve, ir kabeliu. Elektros signalai sklinda laidais, o šviesos impulsai gali būti siunčiami šviesolaidžiu. Vakuumas (ar tuščia erdvė), kabelis, laidas, šviesolaidis – visa tai yra **terpės**, kuriomis signalai gali būti perduodami. Kiekviena terpė turi savo taikymo sritį. Kai kam nors skambinate, gali būti, kad jūsų pranešimas sklis visomis minėtomis terpėmis. Panagrinėkime, kaip perduodamas tolimasis pokalbis tarp žmonių, gyvenančių Didžiojoje Britanijoje ir JAV.

21.21a) pav. **Tarpžemyninio telefono pokalbio blokinė schema**

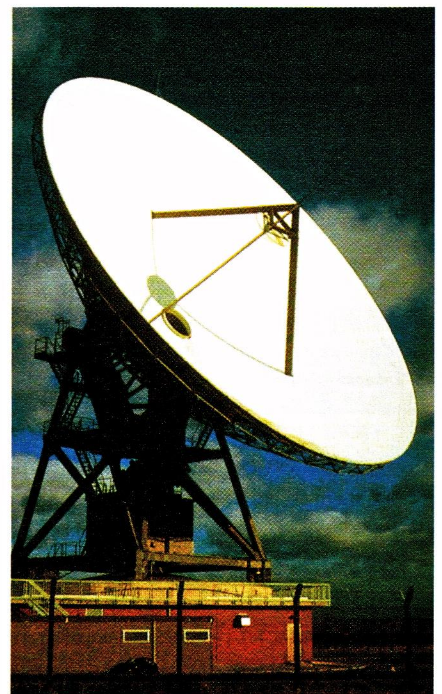


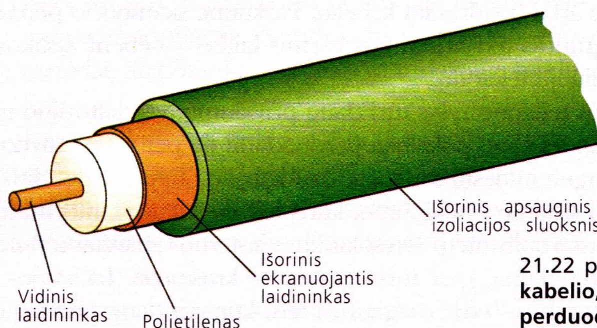
Pirmiausia skambinančiojo skambutis (elektros signalo pavidalo) patenka į artimiausią telefono stotį **laidu** (laidai paprastai tiesiami poromis, kad sudarytų uždarą elektrinę grandinę). Paprastai laidu vienu metu gali sklisti tik vienas signalas, tačiau to visai pakanka, nes vienas telefono aparatas ir negali atlikti daugiau funkcijų.

Vietinėje telefono stotyje gautasis signalas paverčiamas į skaitmeninį ir sujungiamas su kitais vietinės stoties tvarkomais telefono pokalbiais (multipleksuojamas). Tada šis signalas siunčiamas kaip radijo banga **bendraašiu kabeliu** į pagrindinę telefono stotį.

Bendraašis kabelis yra cilindrinis bangolaidis: radijo banga sklinda išilgai kabelio tarp vidinio ir išorinio laidininkų esančia sritimi (21.22 pav.), kuri yra užpildyta polietilenu arba kitu dielektriku (plačiau apie dielektrikus skaitykite 125 p.). Bendraašiais kabeliais gali sklisti radijo signalai, kurių dažniai yra dešimtys megahercų, t.y. dešimčių megabitų per sekundę greičiu.

21.21b) pav. **D. Britanijos telekomo stoties, esančios Herefordšire, Madlio miestelyje, palydovinio imtuvo antena, kuria retransliuojami tarptautiniai telefono pokalbiai**





21.22 pav. **Bendraašio kabelio, kuriuo perduodamos radijo bangos, sandara**

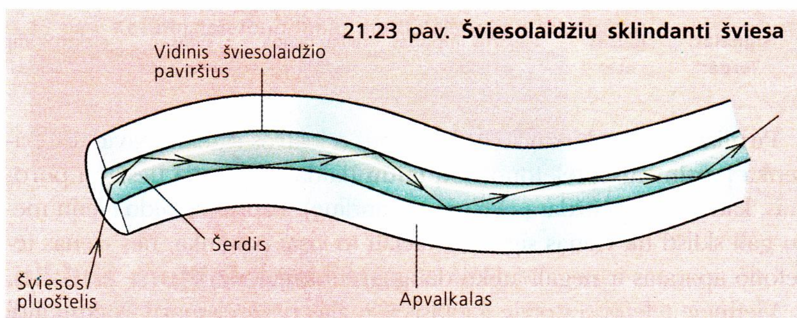
Šviesolaidžiai

Mūsų nagrinėtas tolimasis telefono pokalbis bei daugelis kitų tarpžemyninių pokalbių iš pagrindinės telefono stoties nukreipiami į antžeminę palydovinio ryšio stotį. Kad būtų galima vienu metu perduoti daug signalų, stotys sujungiamos šviesolaidžiu. Taigi elektriniai impulsai paverčiami į šviesos impulsus. Ultrasparčiose optinėse sistemose naudojami infraraudonieji spinduliai. Šių spindulių dažnis yra apie 10^{14} Hz, t.y. jis milijoną kartų didesnis už didžiausią galinčio sklisti bendraašiu kabeliu signalo dažnį. Optinio kabelio pralaidumas siekia 10^{14} bitų per sekundę ir juo vienu metu gali būti perduoti milžiniški informacijos kiekiai. Ir, suprantama, daugybė telefono pokalbių.

Šviesolaidžio veikimo principas

Šviesolaidis (optinė skaidula) gaminamas iš plono stiklinio cilindro, kurio skersmuo apie 5 mm. Tai šviesolaidžio šerdis, įvilkta į mažesnio lūžio rodiklio stiklo sluoksnį. Jeigu šviesa patenka į šerdį pakankamai dideliu kampu, tai dėl visiškojo vidaus atspindžio nuo šerdies ir apvalkalo ribos šviesa tarsi uždaroma šerdyje. Atsispindėdamas nuo ribos šviesos pluoštelis sklinda šviesolaidžiu maždaug taip, kaip pavaizduota 21.23 paveiksle.

Be jau nurodytų privalumų, šviesolaidžiu sklindantys signalai pasižymi dar ir tuo, jog jų neveikia elektrinės jėgos, be to, jie neiškraipomi, nes tokie signalai nekuria magnetinio lauko, kaip laidininku tekanti elektros srovė.



21.23 pav. Šviesolaidžiu sklindanti šviesa

Antžeminėje palydovinio ryšio stotyje optinis signalas paverčiamas į elektrinį signalą, tačiau pastarasis išlieka skaitmeninis. Tuomet šis signalas mikrobangų pavidalu perduodamas į palydovą, kuris skrieja stacionaria Žemės orbita (t. y. jo padėtis virš planetos paviršiaus nekinta). Mikrobangų dažnis yra apie 10 GHz (10 gigahercų, arba 10^{10} Hz). Dėl to mikrobangos nepasižymi tokia didele pralaidumo geba kaip optiniai signalai, tačiau ji pakankama tūkstančiams telefono pokalbių ir keletui TV programų perduoti vienu metu.

Palydovas retransliuoja signalą žemyn į kitą antžeminę palydovinio ryšio stotį, esančią Amerikoje. Toliau skambutis nukreipiamas reikalinga kryptimi optiniu arba bendraašiu kabeliu. Paskutinė skambučio perdavimo į telefoną grandis tikriausiai bus varinis laidas – nebent atsakovas naudotųsi mobiliuoju telefonu.



K Kas vyksta paskutiniame signalo kelionės etape?

Nors išnagrinėtas telefono ryšys turi daug privalumų, vis dėlto šiuo metu tarpžemyniniai telefono pokalbiai perduodami ne per ryšių palydovą, o vandenyno dugne nutiestu šviesolaidiniu kabeliu. Taip yra dėl didžiulio šviesolaidinių sistemų pralaidumo, kuris leidžia sukurti „informacijos magistrales“. Pastaruoju metu šviesolaidinės sistemos sparčiai tobulėja, jų vis daugiau įrengiama, ypač turtingesniuose kraštuose. Tačiau jos vis dar palyginti brangios, todėl diegiamos ten, kur yra daug potencialių vartotojų.

INTERNETAS IR ŠVIESOLAIDŽIAI

Internetas atsirado kartu su skaitmeninėmis ryšio sistemomis. Iš pradžių tai buvo nedidelis tinklas, jungiantis keleto JAV tyrimų centrų ir aukštųjų mokyklų kompiuterius. Netrukus šis tinklas be didelių išlaidų išaugo į pasaulinio masto sistemą, jungiančią į visumą nesuskaičiuojamą daugybę skirtingų kompiuterinių tinklų.

Viena labiausiai naudojamų interneto teikiamų paslaugų yra žiniatinklis WWW (**W**orld **W**ide **W**eb – pasaulinio masto tinklas). Ši pasaulinės sistemos dalis suteikia galimybę vartotojams pasiekti įvairiausios informacijos šaltinius, pradedant nuo paprasčiausių tekstinių dokumentų ir baigiant įvairialype terpe – stereosignalais, grafine informacija ir netgi vaizdo įrašais. Norint perduoti tokį didelį informacijos kiekį reikia sujungti pasaulinį tinklą itin pralaidžiomis ryšio priemonėmis. Tam geriausiai tinka šviesolaidžiai. Šviesolaidinius kabelius paprastai sudaro keli šviesolaidžiai, vieni jų skirti perduoti informacijai į vieną pusę, kiti – į priešingą. Paprastai tokiame kabelyje būna nuo šešių iki dvylikos porų šviesolaidžių. Kiekvieno šviesolaidžio pralaidumas yra apie 500 megabitų per sekundę.

Duomenų perdavimas jau seniai tapęs įprastu reiškiniu. Šiame skyriuje išnagrinėjome, kaip skirtingų rūšių signalai gali būti paverčiami skaitmeniniais. Skaitmeninių signalų moduliacija užtikrino didelį informacijos perdavimo patikimumą ir lankstumą, o milžiniškas šviesolaidinių sistemų pralaidumas sudarė sąlygas atsirasti videofonams ir internetui. Dabar vienu šviesolaidžiu galima perduoti įvairiausios rūšies informaciją, ir dar lieka vietos šviesolaidyje tūkstančiams signalų. Naudojant laikinį multipleksavimą, visa ši informacija gali sklisti vienu kabeliu tuo pat metu. Šiuo metu viename šviesolaidyje telpa 7680 kanalų, o paties naujausio tarpžemyninio optinio kabelio TAT 12/13 šviesolaidžių pora – 300 000 telefono pokalbių vienu metu.



21.24 pav. **Šviesolaidžiais internete perduodamų duomenų srauto kitimas per dvejus metus (1993–1994) ir šviesolaidinis kabelis**

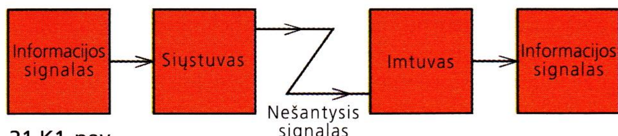
SANTRAUKA

Išnagrinėję šį skyrių jūs turėtumėte suprasti ir žinoti tokius dalykus:

- Elektromagnetinės bangos, ypač radijo ir šviesos bangos, gali būti naudojamos informacijai perduoti.
- Informacijos susiejimas su nešančiąja banga vadinamas moduliacija. Naudojami du moduliacijos metodai: amplitudinė moduliacija ir dažninė moduliacija.
- Juostos plotis yra radijo stoties transliuojamų dažnių arba signalą sudarančių dažnių intervalas.
- Juostos plotis = 2 × garso dažnių juostos plotis. Perdavimo sparta = išrankos dažnis × bitų skaičius vienam matavimui.
- Trikdžiai – tai atsitiktiniai signalai, visada sklindantys elektrinėse grandinėse. Atmosferos trikdžiai ir elektros įrenginių generuojami laukai taip pat gali paveikti perduodamus signalus.
- Analoginiai ir skaitmeniniai signalai gali būti keičiami vieni į kitus.
- Skaitmeniniai signalai gali nesutrikdomai sklisti didesniais atstumais nei analoginiai signalai.
- Kodinė impulsinė moduliacija yra skaitmeninės moduliacijos metodas, naudojamas moderniose ryšio sistemose ir garso bei vaizdo informacijai įrašyti, užtikrinant labai aukštą atkūrimo kokybę.
- Multipleksavimas yra procesas, kurio metu suvienijama daug signalų.
- Elektromagnetinės bangos gali sklisti erdve, laidais bei šviesolaidžiais.
- Šviesolaidžiai pasižymi dideliu pralaidumu ir jų neveikia elektriniai reiškiniai.

KLAUSIMAI

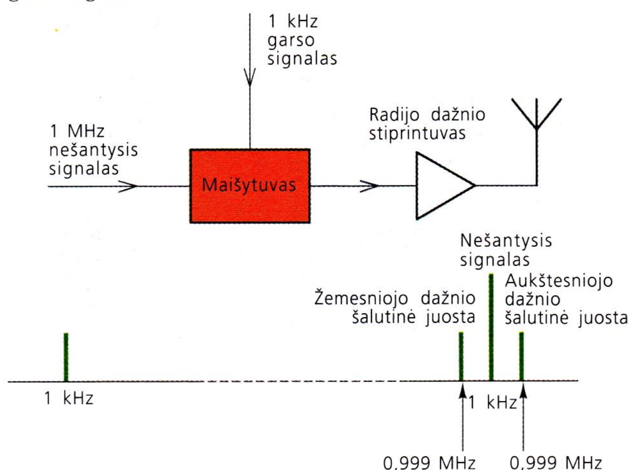
1 21.K1 pav. atvaizduota ryšių sistemos blokinė schema. Žemiau pateiktame sąraše nurodytos keturios ryšio sistemos. Kiekvienu atveju nurodykite, kas yra signalo siųstuvas, jo imtuvas ir nešantysis signalas.



21.K1 pav.

a) Du žmonės kalbasi kambaryje.
b) Du žmonės kalbasi telefonu.
c) FM radijo stotis transliuoja muziką.
d) Elektroninė žinutė iš vieno kompiuterio siunčiama į kitą kompiuterį internetu.

2 21.K2 paveiksle pavaizduota amplitudinės moduliacijos siųstuvo blokinė schema ir dažnių spektras, kuris atsiranda 1 MHz nešantįjį signalą moduliuojant 1 kHz garso signalu.



21.K2 pav.

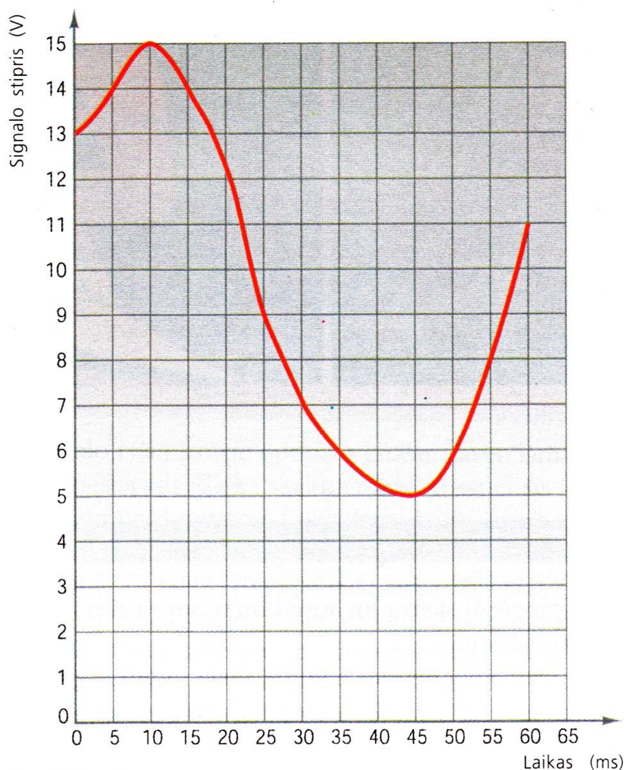
a) Radijo dažnio stiprintuvas nestiprina žemiausiojo dažnio signalo. Koks yra perduodamo signalo juostos plotis?
b) Garsas pakeičiamas garsiniu signalu, kurį sudaro įvairių dažnių nuo 300 Hz iki 3,4 kHz harmonikos. Nurodykite dažnius, kuriuos generuoja maišytuvas, moduliuodamas **(i)** 300 Hz dažniu ir **(ii)** 3,4 kHz dažniu.
c) Nubraižykite antenos siunčiamųjų signalų dažnių spektrą.
d) Koks yra signalo juostos plotis **b)** klausime?
e) Įvertinkite, kiek radijo stočių, transliuojančių **b)** atveju apibrėžtus signalus, gali tilpti į dažnių diapazoną nuo 800 kHz iki 1200 kHz.
f) Geros kokybės garsas turi būti perduodamas garsiniu signalu, kurio dažnių spektras yra nuo 20 Hz iki 20 kHz. Kiek radijo stočių, transliuojančių aukštos kokybės signalus, galėtų tilpti **e)** nurodytoje dažnių srityje?

3

a) Kas yra dažninė moduliacija?
b) Kodėl AM transliacijas trikdžiai labiau veikia negu FM transliacijas?
c) Didžiojoje Britanijoje FM transliacijoms naudojamas dažnių intervalas nuo 88 MHz iki 108 MHz. Aukštos kokybės transliacijoms reikia 1 MHz juostos pločio.
 (i) Kiek tokių radijo stočių gali būti 88–108 MHz diapazone?
 (ii) Didžiojoje Britanijoje FM diapazone transliuojančių radijo stočių yra daug daugiau už jūsų **(i)** atsakyme gautą skaičių. Kodėl šių stočių transliacijos nepersikloja?

4

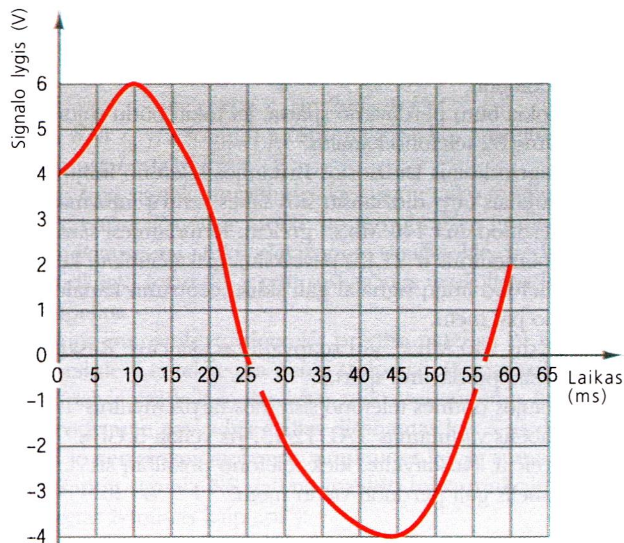
21.K4 pav. pateikta analoginio signalo kreivė; horizontalioje ašyje atidėtas laikas milisekundėmis, o vertikalioje ašyje – signalo stipris voltais. Nukopijuokite šį grafiką ant milimetrinio popieriaus lapo.



21.K4a) pav.

a) Milimetriniame popieriuje nubrėžkite vertikalias linijas kas 5 milisekundės.
b) Išmatuokite kiekvienos linijos ilgį voltais ir rezultatus surašykite į sąsiuvinį.
c) Paverskite visas išmatuotas signalo amplitudes į keturių bitų dvejetainį kodą.

Paveiksle pateiktas signalas yra teigiamas bet kuriuo laiko momentu. 21.K4 paveiksle pateiktas labai panašus signalas. Šis signalas kinta taip, kad turi ir teigiamą, ir neigiamą dalį. Kaip reikia užkoduoti tokį signalą, kad galėtume atskirti neigiamas ir teigiamas signalo amplitudės vertes?

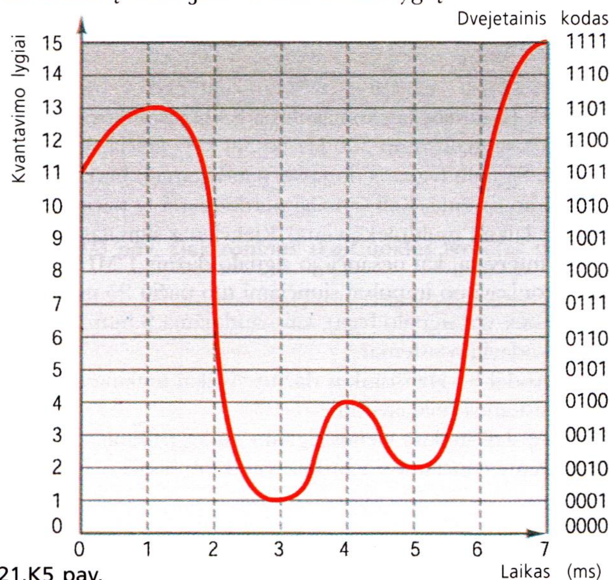


21.K4b) pav.

Atsakymas į šį klausimą yra toks: reikia naudoti 5 bitų kodavimą. Papildomas bitas pridedamas iš kairės pusės. Jei signalas teigiamas, tai šio bito vertė lygi „1“, o jeigu neigiamas, rašomas „0“.

d) Atsakykite į **a)**, **b)** ir **c)** klausimus, 21.K4 paveiksle pateiktam signalui naudodami 5 bitų kodavimą.

5 Žemiau pateiktas analoginis signalas yra išmatuotas kas sekundę naudojant 16 kvantavimo lygių.



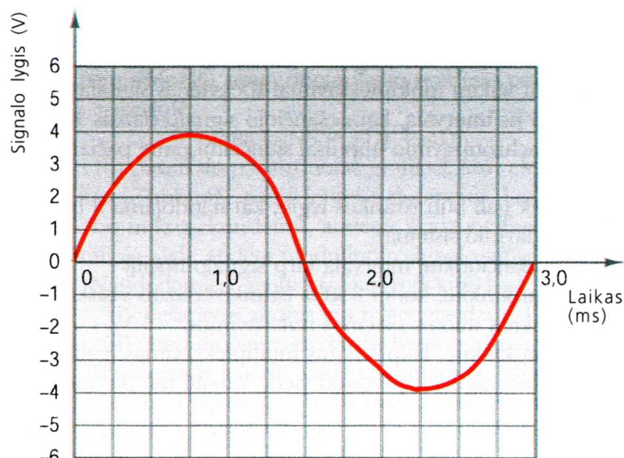
21.K5 pav.

Baikite pildyti žemiau pateiktą lentelę: kiekvieną matavimo rezultatą paverskite dvejetainiu kodu ir pavaizduokite grafiškai skaitmeninį jo atitikmenį. Kokio didžiausio dažnio analoginį signalą galima tiksliai paversti skaitmeniniu esant tokiam išrankos dažniui?

Laikas (ms)	0	1	2	3	4	5	6	7
Dvejetainis kodas	1011							
Skaitmeninis išėjimo signalas								

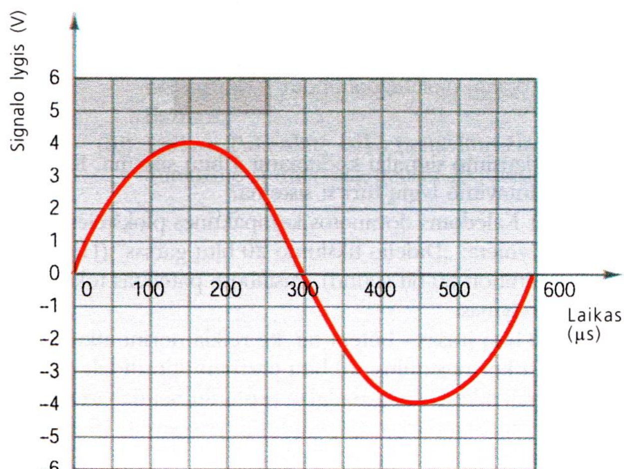
6 Telefono sistemose naudojamas 8 kHz (8000 impulsų per sekundę) išrankos dažnis.

a) Koks laiko tarpas skiria dvi gretimas imtis?



21.K6a) pav.

b) 21.K6 a) paveiksle pateiktas žemojo dažnio garsinis signalas. Išmatuokite šį signalą tokiais pat laiko intervalais kaip ir **a)** užduotyje.
Kaip galima tiksliau pažymėkite kiekvieną rezultatą vertikaliu brūkšniu ties atitinkama horizontalios ašies vieta, kad tarp signalo imčių būtų vienodas atstumas.



21.K6b) pav.

c) 21.K6 b) paveiksle pateiktas tokios pat formos, tik aukštesnio dažnio garsinis signalas. Išmatuokite šį signalą tokiais pat laiko intervalais ir nubraižykite panašią imčių schemą kaip ir **b)** užduotyje.

d) Esant duotam išrankos dažniui, didžiausias pakankamai tiksliai atkurto pradinio analoginio signalo dažnis yra 4 kHz.
Kiek signalo imčių esant tokiam dažniui užregistruojama vieno periodo metu?
Kaip pagal šiuos matavimus galima sėkmingai atkurti pradinį signalą?

7 Perskaitykite žemiau pateiktą tekstą ir atsakykite į klausimus.

D. Britanijos telekomas vartoja 8 kHz išrankos dažnį garso signalams nuo 300 Hz iki 3,4 KHz pakeisti į skaitmeninį pavidalą. Signalų lygiams nustatyti vartojama 8 bitų kodavimo sistema. Keli signalai siunčiami tuo pačiu kanalu naudojant laikinį multipleksavimą. Kiekvienas signalas užima 25 μs intervalą, kai nešančiojo signalo dažnis 1 MHz. Sinchronizavimo impulsai siunčiami tame pačiame 25 μs ruože.

a) Kiek gali būti išrankos lygių, kai naudojama 8 bitų kodavimo sistema?

b) Apskaičiuokite intervalą tarp signalo imčių.

c) Paaiškinkite, kodėl 8 kHz išrankos dažnis visiškai tenkina duotos sistemos reikalavimus.

d) Paaiškinkite, kaip laikinis multipleksavimas įgalina penkis signalus perduoti vienu kanalu tuo pat metu.

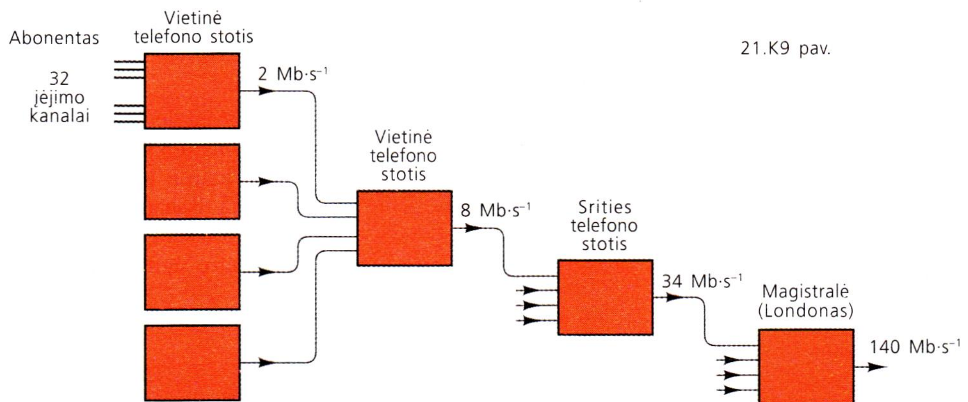
Laikinio multipleksavimo būdu galima vienu kabeliu ar šviesolaidžiu tuo pat metu siųsti kelių kanalų duomenis.

c) Kokia būtų perdavimo sparta, jei tokiu būdu sujungtume 32 telefono kanalus?

d) Pagrindiniais Didžiosios Britanijos telefono linijų kanalais tarp didžiausių šios šalies centrų informacija perduodama 140 $Mb \cdot s^{-1}$ greičiu. Remdamiesi šiais duomenimis ir 21.K9 paveikslu, apskaičiuokite kelių telefono linijų signalai gali sklisti centriniu kanalu tuo pat metu.

e) Dydis 140 $Mb \cdot s^{-1}$ yra suapvalintas skaičius. Raskite tikslią perdavimo spartą.

f) Naujos optinės telefono sistemos tarpžemyninis kabelis vadinamas TAT 12/13. Jis veikia 5 $Gb \cdot s^{-1}$ greičiu. Nustatykite, kiek telefono pokalbių šis kabelis gali perduoti vienu metu.



21.K9 pav.

8

a) 6 klausimo signalai koduojami 4 bitų sistema. Kiek kvantavimo lygių turi ši sistema?

b) Ant Kalėdoms dovanotos kompaktinės plokštelės pažymėta: „Didelio tikslumo 20 bitų garsas" (High definition 20-bit sound). Pastabose pateiktas toks aprašymas:
„20 bitų įrašas – būtent tai, ko reikia norint atkurti muzikos pustonius. 20 bitų pasižymi itin didele skyra ir gali atkurti daug daugiau pustonių nei dabartinis 16 bitų standartas. 20 bitų įrašai yra beveik 16 kartų jautresni nei 16 bitų įrašai".
Aprašyme nurodyta, kad dabartinis kompaktinės plokštelės standartas yra 16 bitų.

(i) Paaiškinkite, ką tai reiškia. Kiek signalo lygių standartas leidžia?

(ii) Kodėl naudojant 20 bitų gaunama beveik 16 kartų didesnė skyra nei įrašant 16 bitų standartu?

9 Skaitmeninės sistemos aprašomos perdavimo sparta. Tai yra per sekundę perduodamų dvejetainių skaitmenų skaičius. Perdavimo spartos vienetai yra $b \cdot s^{-1}$, $kb \cdot s^{-1}$, $Mb \cdot s^{-1}$ ir pan. Vieno kanalo perdavimo sparta apskaičiuojama remiantis tokia lygtimi:

perdavimo sparta = bitų skaičius × išrankos dažnis

Telefono sistemos išrankos dažnis 8 kHz, o kiekviena imtis koduojama 8 bitų dvejetainiu skaičiumi.

a) Kiek imčių sistema užregistruojama kiekvieną sekundę?

b) Apskaičiuokite perdavimo spartą.

10 D. Britanijos telekomas dirba 8 kHz išrankos dažniu, kai garso signalus nuo 300 Hz iki 3,4 kHz keičia skaitmeniniais. Signalų lygiams nustatyti naudojama 8 bitų kodavimo sistema. Keli signalai perduodami ta pačia terpe, taikant laikinį multipleksavimą? Kiekvienas signalas užima 25 μs intervalą, kai nešančiojo signalo dažnis 1 MHz. Sinchronizavimo impulsai siunčiami tuo pačiu 25 μs ruožu.

a) Kiek yra signalo lygių, kai naudojama 8 bitų kodavimo sistema?

b) Kodėl 8 kHz išrankos dažnis visiškai tenkina duotos sistemos reikalavimus?

c) Apskaičiuokite vienos signalo imties trukmę.

d) Kam siunčiami sinchronizavimo impulsai?

11 Išnagrinėję šią užduotį suvoksite, kaip maišant skirtingų dažnių signalus gaunamas moduliuotos amplitudės signalas. Tam prireiks elektroninės skaičiuoklės programos, kuria galima braižyti grafikus.

Amplitudinė moduliacija atliekama susiejant du labai skirtingų dažnių signalus.

Kad būtų paprasčiau, naudosime paprastą moduliacijos signalą – tam tikro dažnio f_0 garsą; nešančiojo signalo dažnis daug didesnis ir lygus f_n.

Nešančiojo signalo amplitudė laiko momentu t gali būti apskaičiuojama pagal tokią formulę:

$$a = a_0 \sin(2\pi f_n t)$$

kur a_0 yra maksimali amplitudė.

Dviejų šalutinių juostų signalai yra vienodi, tačiau jų dažniai šiek tiek skiriasi:

$$b = b_0 \sin 2\pi(f_n - f_0)\, t$$
$$c = c_0 \sin 2\pi(f_n + f_0)\, t$$

kur b_0 ir c_0 yra šoninių juostų maksimalios amplitudės; jos paprastai esti lygios.

Visų trijų signalų amplitudes kiekvienu laiko momentu reikia apskaičiuoti ir sudėti; po to nubraižyti grafiką.

Lengviausia tai atlikti elektronine skaičiuokle: įvedus atitinkamą formulę, ji pati suskaičiuos ir užpildys lentelės stulpelius.

Tokios jau užpildytos lentelės pradžia pateikta 21.K11a) paveiksle. Lentelėje yra penki stulpeliai. Pirmajame stulpelyje yra laikas, išreikštas mikrosekundėmis (μs). Parodytame pavyzdyje laikas didinamas kas 5 μs, kiekvienai jo vertei skaičiuojamos amplitudės bei jų suma.

Nešantįjį signalą NS galima išreikšti tokia funkcija („p" neretai žymimas kaip „pi"):

$$NS = \sin [\ rad(2 \cdot \pi \cdot t)]$$

Kad būtų paprasčiau, nešančiojo signalo amplitudė a_0 ir dažnis f_n prilyginti 1.

Lentelė moduliuoto signalo amplitudei skaičiuoti				
Laikas (μs)	Suma	NS	ŽDJ	ADJ
0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
5,00000	0,83388	0,52125	0,14930	0,16333
10,00000	1,42267	0,88967	0,25899	0,27401
15,00000	1,59358	0,99725	0,29999	0,29634
20,00000	1,29700	0,81245	0,26141	0,22313
25,00000	0,62093	0,38945	0,15350	0,07798
30,00000	-0,23518	-0,14773	0,00487	-0,09231
35,00000	-1,01950	-0,64160	-0,14506	-0,23284
40,00000	-1,50217	-0,94736	-0,25650	-0,29830
45,00000	-1,54286	-0,97537	-0,29991	-0,26759
50,00000	-1,13177	-0,71741	-0,26377	-0,15060

21.K11a) pav. **Elektroninės skaičiuoklės lentelės pradžia**

Šalutinių juostų signalus ŽDJ ir ADJ galima išreikšti tokiomis skaičiavimui tinkamomis formulėmis:

$$ŽDJ = 0{,}2 \cdot \sin [rad(1{,}9 \cdot \pi \cdot t)]$$
$$ADJ = 0{,}2 \cdot \sin [rad(2{,}1 \cdot \pi \cdot t)]$$

b_0 ir c_0 prilyginti 0,2, todėl $(f_n - f_0)$ yra lygus 1,9, o $(f_n + f_0)$ yra 2,1.

Visų trijų stulpelių sumą duotai laiko reikšmei pažymėję Suma, gauname:

$$Suma = NS + ŽDJ + ADJ.$$

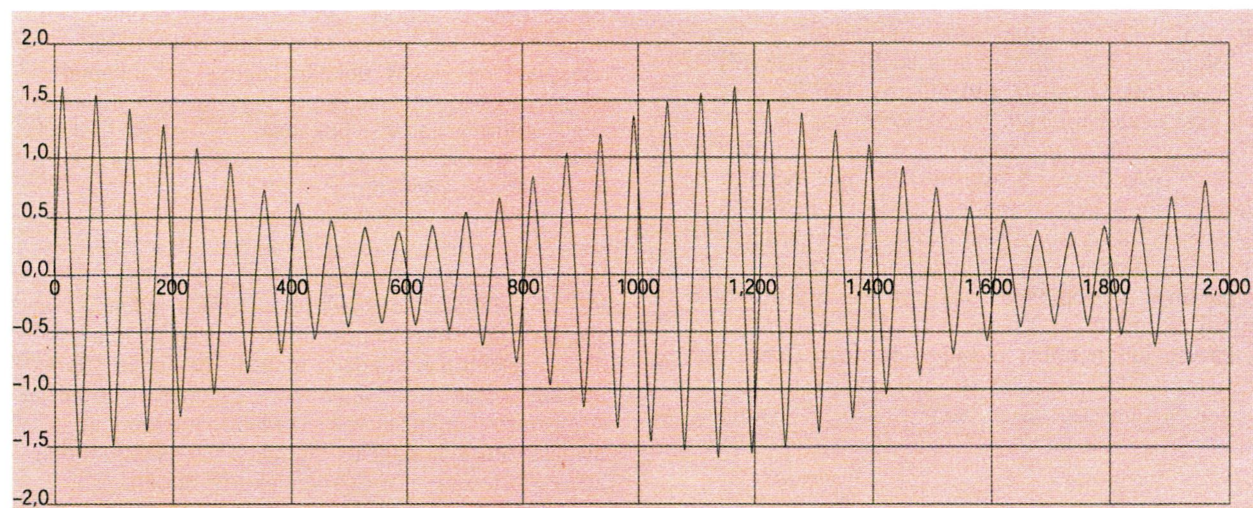
21.K11b) paveiksle pavaizduotas grafikas, kurį elektroninė skaičiuoklė nubraižė pagal lentelės duomenis. Laikas, išreikštas mikrosekundėmis, atidėtas horizontalioje ašyje. Vertikalioje ašyje atidėta moduliuoto signalo amplitudė.

a) Naudodamiesi gautu grafiku įrodykite, kad:
   (i) nešantysis dažnis yra lygus maždaug 17,5 kHz;
   (ii) moduliuojantysis dažnis lygus maždaug 440 Hz.

b) Naudojantis lentele, visus kintamuosius galima labai paprastai pakeisti, o grafiką atnaujinti. Pabandykite pakeisti tokius dydžius:
   (i) $\boldsymbol{b_0}$ **ir** $\boldsymbol{c_0}$: šalutinių juostų amplitudės (jos turi būti vienodos) keičia moduliacijos amplitudę, kuri 21.K11b) paveiksle pateiktame signale yra apie 66%. Išbandykite kitokias amplitudžių vertes ir panagrinėkite gautus rezultatus.

Nustatykite, kokioms b_0 ir c_0 vertėms esant moduliacijos amplitudė lygi 100%. Taip yra tuomet, kai perduodamo signalo amplitudė kartais tampa lygi 0. (Esant didesnei nei 100% moduliacijos amplitudei perduodamasis signalas iškraipomas.)

   (ii) $\boldsymbol{f_n{'}}$ $\boldsymbol{(f_n + f_0)}$ **ir** $\boldsymbol{(f_n - f_0)}$: Išbandykite skirtingus nešančiojo ir moduliuojančiojo (garso) signalo dažnius.
   (iii) **Laikas:** Pakeiskite laiko matavimo žingsnį. Sumažinę šį intervalą, gausite glotnesnę kreivę.



21.K11b) pav.

21 ir 22 skyrių schemos pateiktos 174 p.

Užduotis

PRAKTINĖS RYŠIŲ SISTEMOS

Ryšių sistemos įgalina siųsti ir priimti informaciją kaip signalus, sklindančius įvairiomis terpėmis – varine viela, stikliniais šviesolaidžiais ar tiesiog erdve. Kai signalas tolsta nuo šaltinio, jis silpnėja. Norint signalą perduoti dideliais atstumais, jį reikia nuolat pastiprinti.

Stiprinimo ir slopinimo įvertinimas
Signalai dažnai perduodami dideliais atstumais. Kuo didesni tie atstumai, tuo stipriau signalai slopinami. Jei retransliuojamo signalo galia palydovinio ryšio antenoje yra 30 W, tai antžeminė antena priima viso labo tik maždaug 3 pikovatų (3 pW = 3×10^{-12} W) galios signalą. Tai reiškia, kad signalo galia šiuo atveju sumažėja 10^{13} kartų. Esant tokiam dideliam verčių skirtumui, paprasčiau vartoti ne absoliutines vertes, o jų logaritmus. Dėl to buvo įvesta logaritminė funkcija, kurios vienetas yra decibelas [dB].

Dviejų galių santykis, išreikštas decibelais, apibrėžiamas tokia formule:

$$\text{santykis} = 10.\log_{10}(P_1/P_2).$$

Jeigu santykis yra teigiamas, tai jis rodo signalo, praėjusio pro tam tikrą terpę, **stiprinimą**, o jei santykis neigiamas – **slopinimą.**

Pavyzdžiui:
Sustiprinus 150 mW galios signalą, išėjime gaunamas 600 mW galios signalas. Apskaičiuokite stiprintuvo stiprinimą.

stiprinimas = $10.\log_{10}(600/150) = 10.\log_{10}4 = 10 \times 0{,}602 = 6{,}02$ dB.

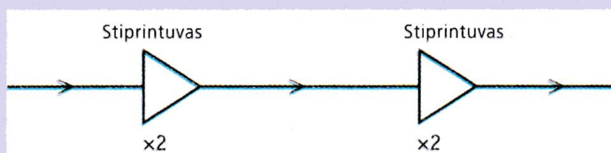
1

a) Apskaičiuokite, kam lygus stiprinimas, jei 40 mW signalo amplitudė padidėja iki **(i)** 80 mW, **(ii)** 125 mW, **(iii)** 62,5 mW, **(iv)** 50 mW, **(v)** 500 mW.

b) Apskaičiuokite, kam lygus slopinimas, jei 500 mW signalo amplitudė sumažėja iki **(i)** 250 mW, **(ii)** 125 mW, **(iii)** 62,5 mW, **(iv)** 50 mW, **(v)** 500 mW.

Verta prisiminti, kad signalo pokytis 3 dB reiškia jo padidėjimą arba sumažėjimą dukart. Logaritminė skalė dar patogi ir tuo, jog bendras sistemos stiprinimas ar slopinimas gali būti įvertinti atliekant atimtį ar sudėtį.

Pavyzdžiui, bendras dviejų stiprintuvų, pavaizduotų 21.U1 paveiksle, stiprinimas gali būti rastas dviem būdais. Paprasčiausiai sudauginę (2 × 2) gauname 4 kartų stiprinimą. Jeigu stiprinimą skaičiuotume decibelais, tai bendras stiprinimas yra lygus 6 dB (3 dB + 3 dB). Vadinasi, stiprinimas 4 kartais atitinka 6 decibelus.

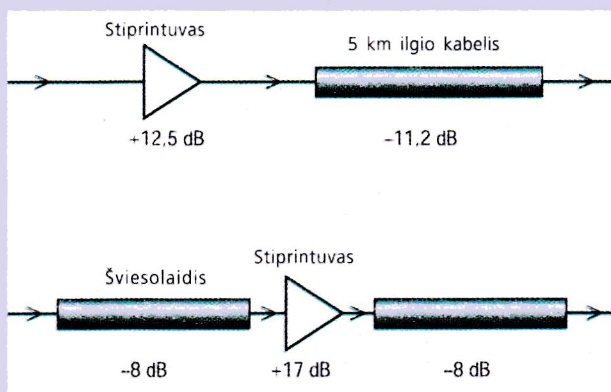


21.U1 pav. Dviejų pakopų stiprintuvas

Taigi norint sužinoti bendrą susilpnėjimo ir stiprinimo poveikį signalui, reikia tiesiog susumuoti visus koeficientus, išreikštus decibelais.

Pravartu pakartoti šiek tiek matematikos:
$\log_{10}(2x2) = \log_{10}2 + \log_{10}2 = 0{,}3010 + 0{,}3010 = 0{,}6020.$
Daugybai galioja tokia taisyklė: $\log_{10}(a \cdot b) = \log_{10} a + \log_{10} b$,
o dalybai tokia: $\log_{10}(a/b) = \log_{10} a - \log_{10} b$

c) Koks yra bendras signalo stiprinimas schemose, pateiktose 21.U2 paveiksle?



21.U2 pav.

Trikdžiai
Trikdžiai yra didžiausia ryšio sistemų problema. Kasdieninė žodžio „trikdžiai" reikšmė yra bet kokie nepageidaujami garsai. Visai neblogas elektrinių trikdžių modelis yra daugybės žmonių, esančių kokioje nors patalpoje, tarpusavio kalbos garsų šurmulys. Bet kas įėjęs į tą patalpą išgirs tiktai triukšmą – nė vienas pokalbis nebus pakankamai aiškus, kad būtų galima suprasti jo turinį, t.y. tiksliai priimti informaciją. Visi pokalbiai yra tiesiog triukšmas, tačiau jis beveik toks pat stiprus kaip signalas, kurį norima išgirsti (išskirti).
Ryšių sistemose sklindančius signalus veikia įvairiausios kilmės trikdžių šaltiniai.
Bet kurioje elektrinėje grandinėje ar kabelyje elektronai juda chaotiškai, šis chaotinis judėjimas ir sąlygoja elektrinės kilmės trikdžius. Ilgesniame kabelyje elektriniai trikdžiai didesni. Be to jie stiprėja kabeliui kaistant – tai vadinamieji „šiluminiai" trikdžiai. „Atmosferos" trikdžiai veikia radijo ir mikrobangų pavidalo oru sklindančius signalus. Tai vyksta todėl, kad atmosferoje esančios molekulės sugeria perduodamas elektromagnetines bangas ir perspinduliuoja jas bet kuria kryptimi. Gamtiniai trikdžių šaltiniai, tokie kaip žaibas, gali paveikti radijo signalus visoje planetoje.

2 Paaiškinkite, kodėl kodinės impulsinės moduliacijos (KIM) signalus triukšmas veikia daug silpniau negu analoginius signalus.

Signalo–triukšmo santykis. Kai signalai sklinda kabeliu, svarbu žinoti trikdžių lygį. Pagal tai galima apskaičiuoti, kokia turi būti signalo galia, kad jis pasiektų kitą kabelio galą. Kitame gale signalo galia turi būti didesnė už trikdžius. Tai įvertinama santykiu signalas / trikdžiai (ST), kuris matuojamas decibelais: ST santykis = $10.\log_{10}$(signalo galia) / (trikdžių galia). Šio santykio vertė priklauso nuo moduliacijos metodo. Telefono sistemose pasirinkta 20 dB vertė – tai reiškia, kad norint tokia linija atsklidusį signalą tiksliai atkurti, jo ST santykis turi būti ne mažesnis kaip 20 dB.

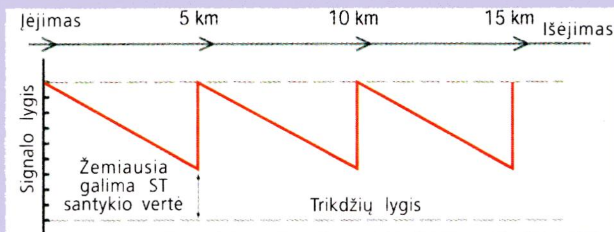
3 Telefono linijoje išmatuota trikdžių galia yra 100 mW. Kokia turi būti priimamo signalo galia vatais?

Tolimųjų perdavimų kabeliai. Kabelių slopinimas matuojamas $dB \cdot km^{-1}$. Tipinis tokių kabelių slopinimas yra 14 $dB \cdot km^{-1}$.

4

a) Kabelio pradžioje signalas yra 100 dB stipresnis už trikdžių lygį kabelyje. Priimamo signalo ST santykis turi būti 40 dB. Kiek kilometrų signalas nusklinda kabeliu, kol jo ST santykis tampa mažesnis už reikalaujamą?

Kartotuvai. Norint palaikyti sklindančio signalo galią, kabeliuose vienodais atstumais vienas nuo kito įrengiami specialūs stiprintuvai – signalo kartotuvai. Jie užtikrina, kad ST santykis niekada netaps mažesnis už nustatytą vertę.



21.U3 pav. Kartotuvai stiprina sklindantį signalą

b) 21.U3 paveiksle pateikta tipinė schema, kurioje naudojami trys kartotuvai. Tarę, kad žemiausia galima ST santykio vertė yra 40 dB, raskite **(i)** kabelio slopinimą, išreikštą $dB \cdot km^{-1}$, **(ii)** kiekvieno kartotuvo stiprinimą.

Kartotuvai yra labai brangūs įrenginiai, ypač tie, kurie montuojami jūros dugne, tačiau jie vis tiek naudojami.

c) Kodėl negalima sustiprinti į kabelį įeinantį signalą tiek, kad nereiktų naudoti kartotuvų?

d) Tarę, kad 21.U3 paveiksle pavaizduoto signalo galia išėjime yra 100 mW, raskite, kokia turi būti įeinančio signalo galia kabelio pradžioje, kad išjungus kartotuvus jis pasiektų išėjimą.

Šviesolaidinės ryšių sistemos

Bendraašiai kabeliai vis sparčiau keičiami šviesolaidžiais. Šviesolaidžiai gaminami iš stiklo, kuriuo gali sklisti šviesa. Dėl to signalai paverčiami į infraraudonosios šviesos impulsus, kurių bangos ilgis 1,55 μm. Dalį šviesolaidžiu sklindančios šviesos absorbuoja ir išsklaido stiklas. 1,55 μm bangos ilgis pasirinktas todėl, kad esant šiai vertei minėti efektai pasireiškia silpniausiai. Tipinis optinio kabelio slopinimas yra 0,3 $dB \cdot km^{-1}$.

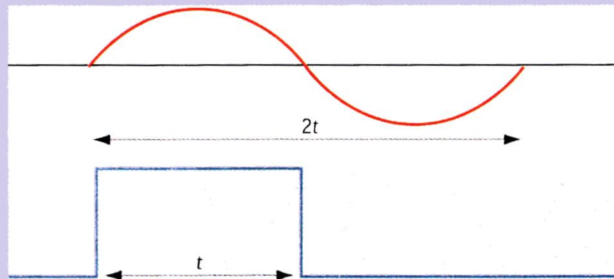
5

a) Kiek kartotuvų reikėtų panaudoti **4a)** ir **b)** klausimams pateiktoje schemoje, jeigu vietoj kabelio būtų naudojamas šviesolaidis?

Dar vienas optinių kabelių privalumas yra didelė jų pralaidumo juosta. Bendraašiais kabeliais galima perduoti ne didesnio kaip 500 MHz dažnio signalus.

b) Kokia yra viršutinė šviesolaidžiu sklindančių signalų dažnio riba?

Kai kalbame apie skaitmeninių duomenų perdavimą, sąvoka „juostos plotis" netenka prasmės. Tačiau ją galima susieti su vieno bito trukme. Vienam bitui perduoti reikia mažiausiai pusės sinusinės bangos svyravimų periodo.



21.U4 pav.

Vadinasi, sinusinės bangos periodas yra dvigubai ilgesnis už vieno impulso trukmę.

c) Pasinaudoję klausimo **5b)** atsakymu, įvertinkite mažiausią bito trukmę ir perdavimo greitį.

Šviesolaidžiu sklindantis signalas yra moduliuotas **kodinės impulsinės moduliacijos** metodu. Elektriniai impulsai paverčiami į infraraudonojo lazerio šviesos impulsus. Šviesolaidžio apertūra yra tokia siaura (vienos skaidulos šviesolaidžiams – nuo 3 iki 8 μm), kad norint į jį įvesti pluoštelį, kaip šviesos šaltinį reikia naudoti puslaidininkinį lazerį. Mikroelektroninė tokio lazerio valdymo grandinė įstengia jį perjungti milijonus kartų per sekundę ir tokiu būdu sudaryti trumpus impulsus. Tačiau greitų valdymo įrenginių sukūrimas vis dar yra pagrindinė problema, ribojanti perdavimo šviesolaidžiais spartą.

6

a) Keletą metų buvo naudojami optiniai kabeliai, kurių perdavimo greitis 140, 280 ir 560 $Mb \cdot s^{-1}$. Kokia yra vieno bito trukmė šiuose kabeliuose?

Dispersija yra dar vienas veiksnys, ribojantis duomenų perdavimo šviesolaidžiais spartą (apie dispersiją skaitykite 13 p.).

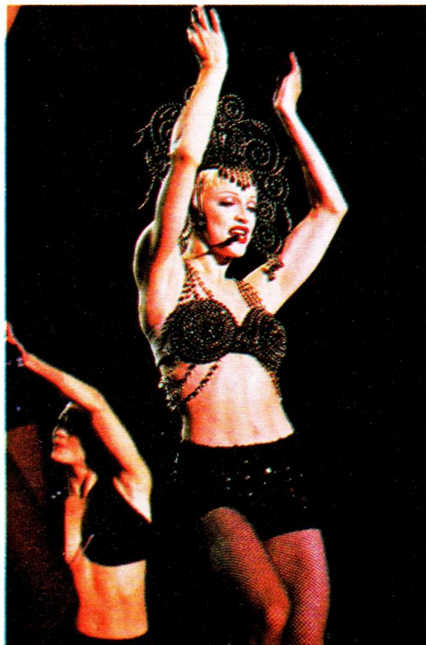
b) Paaiškinkite, kokiu būdu dispersija riboja perdavimo spartą.

22 Fizikinė elektronika



Viršuje: Scenoje išraizgyti laidai trukdo muzikantams laisvai judėti

Apačioje: Madona gali nevaržomai judėti scenoje, nes ji prisisegusi miniatiūrinį radijo mikrofoną ir ausinuką



Dar visai neseniai populiariosios muzikos atlikėjai turėjo prisitaikyti prie daugybės scenoje išraizgytų laidų ir išdėliotos įvairiausios pagalbinės technikos. Dabar koncertų salių scena neatpažįstamai pasikeitė, muzikantams ir dainininkams nereikia tampyti paskui save laidų, mikrofonų ir garsiakalbių. Šias permainas nulėmė elektroninės muzikos technikos laimėjimai pastaraisiais metais. Dainininkai ir muzikantai girdi, kaip groja kiti jų grupės nariai arba kaip skamba jų grupės atliekami kūriniai. Dar visai neseniai jie turėjo pasikliauti scenos garsiakalbiais ir pagal iš jų girdimą muziką derinti savo instrumentus ar keisti garso stiprumą.
Šiandien, kai sukurtos miniatiūrinės elektroninės grandinės, dainininkai ir muzikantai naudojasi ne scenos garsiakalbiais, o mažais ausinukais. Garso operatoriai sujungia visų instrumentų ir dainininkų balsų skleidžiamus garsus ir signalą perduoda radijo siųstuvui, kuris paprastai būna ne arčiau kaip 100 metrų nuo scenos. Kiekvienas muzikantas turi baterija maitinamą radijo imtuvėlį, kuris priima siųstuvo signalą ir laidais perduoda jį į ausinuką. Imtuvėlyje yra garso reguliatorius, todėl muzikantai gali reguliuoti garso stiprumą.
Ši sistema pasižymi keliais privalumais. Pirmiausia, scena yra daug saugesnė, kai joje nėra garsiakalbių ir laidų. Be to, muzikantų klausos nedirgina stiprus garsas iš garsiakalbių, nes dabar jie gali patys nustatyti ausinuko garso lygį. Griaudžiantis muzikos triukšmas, sklisdavęs pro scenos garsiakalbius, jau tolimoje praeityje. Ir koncerto lankytojai girdi daug geresnės kokybės garsą, nes garsiakalbiai dabar nukreipti tiktai į juos.

Įvadas

Šiame skyriuje nagrinėjamos elektroninės grandinės ir sistemos. Elektronika yra praktinis mokslas, todėl būtų idealu, jei turėtumėte galimybę patys išbandyti bent kai kurias grandines ir patikrinti, ar tikrai jos veikia taip, kaip mūsų aprašyta. Tada jūs galėsite įsitikinti, ar teisingi pagrindiniai šiame skyriuje pateikiami teiginiai.

Elektroniniai prietaisai gali atlikti daugybę užduočių. Pavyzdžiui, elektroninė skalbyklės sistema gali parinkti skirtingos rūšies skalbiniams tinkamą vandens temperatūrą ir skalbimo trukmę. Sistema kontroliuoja įtekančio ir ištekančio vandens kiekį bei pakaitina vandenį, kai to reikia. Ji taip pat valdo skalbinių skalavimo ir gręžimo procesus.

Kitas pavyzdys gali būti automobiliniai radijo imtuvai. Kai kurie tokie imtuvai patys susiderina stipriausiam priimamam signalui. Vairuotojas gali net nežinoti, kas vyksta: kai ilgoje kelionėje automobilis patenka iš vieno siųstuvo zonos į kitą, imtuvas pats persiderina prie pakitusio tos pačios radijo stoties transliacijos dažnio. Dėl to imtuvo skleidžiamas garsas esti kiek įmanoma aukščiausios kokybės.

Šiame skyriuje išnagrinėsime dažniausiai naudojamų elektroninių grandinių ir sistemų veikimo principus, tarp jų ir tų įtaisų, kurie naudojami skalbyklėse.

1 ELEKTRONINĖS SISTEMOS

Įėjimas, signalo apdorojimas, išėjimas

Bet kurią elektroninę sistemą sudaro trys dalys (22.1 pav.). Elektroninės sistemos reaguoja į **įėjimo** signalus. Signalas yra tai, kas kinta laiko atžvilgiu ir perduoda informaciją. Pavyzdžiui, signalai, į kuriuos reaguoja žmogus, yra temperatūros, šviesos intensyvumo, garso stiprumo pokyčiai ar netgi krepšyje nešamo cukraus masė (ypač tos masės pasikeitimas). Analogiškais signalais galima paveikti ir elektronines sistemas.

Įėjimo blokas paverčia įėjimo signalą – informaciją – į elektroninį signalą. Paprastai elektroninis signalas yra įtampos kitimas laike, atspindintis patenkančios informacijos kitimą. Įėjimo signalas perduodamas į **apdorojimo** bloką. Kol kas pasakysime tik tiek, kad apdorojimo blokas „perdirba" signalą. Šiame skyriuje daugiausiai ir kalbėsime apie keletą skirtingų apdorojančių prietaisų.

Signalas, išeinantis iš apdorojimo bloko, vis dar yra elektroninis signalas. Paskutinis, **išėjimo**, blokas reaguoja į apdorotą signalą ir paverčia jį reikiamos formos signalu – pavyzdžiui, garso ar šviesos signalu, arba tiesiog įjungia ar išjungia variklį.

Įėjimo ir išėjimo blokuose naudojami prietaisai, paverčiantys vienos formos signalus į kitos formos, pavyzdžiui, temperatūros pokytį į įtampos pokytį, slėgio pokytį į elektros srovės pokytį ir pan. Šie prietaisai vadinami **keitikliais** (angliškai „transducer").



22.1 pav. **Elektroninės sistemos blokinė schema**

Keitikliai

Keitikliai yra dviejų tipų: **įėjimo keitikliai** ir **išėjimo keitikliai**. Įėjimo keitikliai yra prietaisai, kurie paverčia kokią nors fizikinę savybę, pavyzdžiui, temperatūrą ar apšviestumą, į įtampą ar į kitą elektrinį dydį. Įėjimo keitikliai neretai vadinami jutikliniais elementais arba tiesiog **jutikliais**.

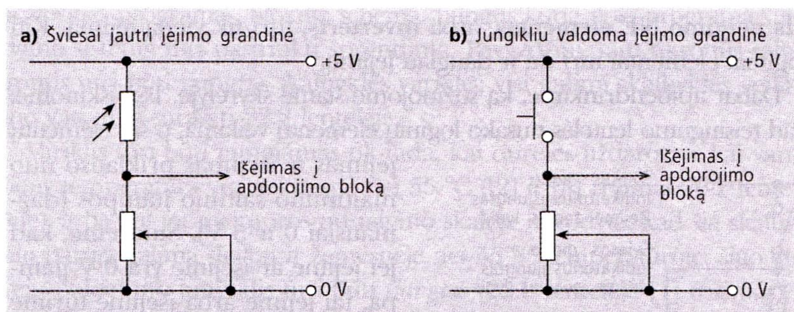
Mikrofonas paverčia garso bangos sukeltus oro slėgio pokyčius į įtampos svyravimus. Šviesai jautrus rezistorius reaguoja į šviesos intensyvumo kitimą – kinta rezistoriaus varža. Šis varžos kitimas, įjungus rezistorių į nesudėtingą grandinę, gali būti paverstas įtampos kitimu (22.2 pav.).

A Kurias fizikines savybes nurodyti įėjimo keitikliai paverčia elektroniniu signalu?

a) termistorius,

b) įtempimo matuoklis,

c) Holo zondas.



22.2 pav. **Dviejų tipų įėjimo grandinės**

Išėjimo keitikliai paverčia elektrinius signalus į kokį nors fizikinį dydį. Pavyzdžiui, garsiakalbis paverčia elektroninį signalą į oro slėgio svyravimus, t.y. garsą.

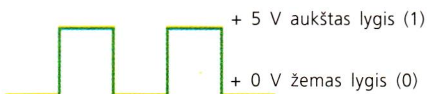
Elektroninės sistemos skirstomos į dvi rūšis: **skaitmenines** ir **analogines** (arba **tiesines**). Tačiau dažnai šios skirtingos sistemos sėkmingai naudojamos kartu kokiam nors tikslui.

B Kokiomis fizikinėmis savybėmis nurodyti išėjimo keitikliai paverčia elektroninius signalus?

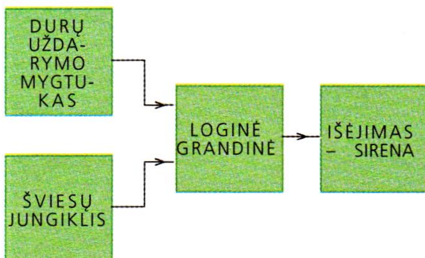
a) elektrinis variklis,

b) elektros lemputė,

c) elektrinis šildytuvas.



22.3 pav. **„Stačiakampė" banga, kurios amplitudė 5 V, yra standartinis skaitmeninių grandinių signalas**



22.4 pav. **Automobilio durų signalizacijos sistemos blokinė schema**

2 SKAITMENINĖS SISTEMOS

Skaitmeninės sistemos apdoroja skaitmeninius signalus. Skaitmeninis signalas gali turėti tik tam tikras apibrėžtas vertes. 22.3b) paveiksle pavaizduotas jungiklis kuria skaitmeninį signalą. Šis jungiklis turi tik dvi būsenas: jis arba išjungtas, arba įjungtas, todėl įtampa jo išėjimo grandinėje gali būti lygi 0 V arba 5 V. Įtampos vertė paprastai lygi grandinę maitinančio šaltinio įtampai. Šioje paprastoje skaitmeninėje grandinėje signalas gali turėti tik dvi skirtingas būsenas. Jos vadinamos **aukšto** lygio ir **žemo** lygio būsenomis.

Kai kurių grandinių paskirtis – generuoti skaitmeninius signalus. Dažniausiai naudojami **nestabiliosios schemos** pagrindu sukonstruoti prietaisai, generuojantys stačiakampę bangą. Stačiakampė banga yra reguliariu dažniu kintantis skaitmeninis signalas. Panašiai kaip ir sinusinė banga, ji nusakoma dažniu ir amplitude, tačiau tokios bangos signalas kinta stačiais šuoliais tarp žemo ir aukšto lygio būsenų (22.3 pav.).

3 SPRENDIMŲ GRANDINĖS – LOGINIAI ELEMENTAI

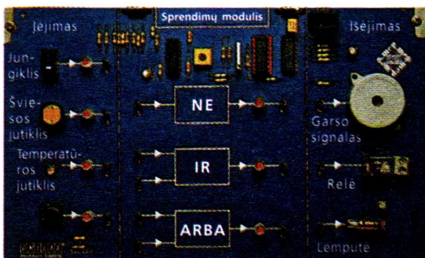
22.1 lentelė. **Įjungtų automobilio šviesų signalizacijos jungiklių deriniai**

Šviesų jungiklis įjungta/išjungta	Durų jungiklis	Garso sirena
Išjungta	Atviros	Išjungta
Išjungta	Uždaros	Išjungta
Įjungta	Atviros	Išjungta
Įjungta	Uždaros	Įjungta

Daugelyje naujų automobilių vairuotoją specialus garso signalas perspėja, kad automobilio žibintai vis dar įjungti, o durelės jau atviros. Sistema, atliekanti šią funkciją, naudoja du įėjimo signalus:

- Mygtukinis mechaninis jungiklis laiko sujungtą grandinę, kai durelės atviros.
- Automobilinių žibintų jungiklis yra išjungtas, kai šviesos nedega, ir įjungtas, kai šviesos dega.

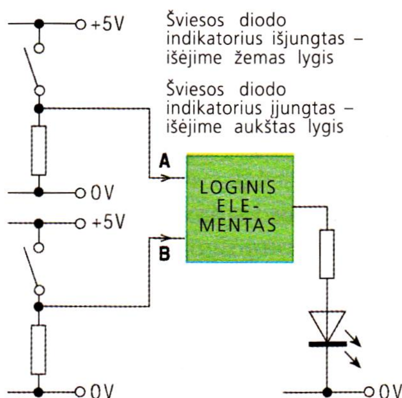
Grandinėje yra vienas išėjimas (22.4 pav.), kuris įjungia garsinį signalą – sireną. 22.1 lentelėje pateikti visi įmanomi durelių ir žibintų jungiklių padėčių deriniai. Tokia skaitmeninių sistemų veikimo schema vadinama **teisingumo lentele**. Tačiau kaip sukurti tokią sistemą, kuri veiktų taip, kaip nurodyta lentelėje?



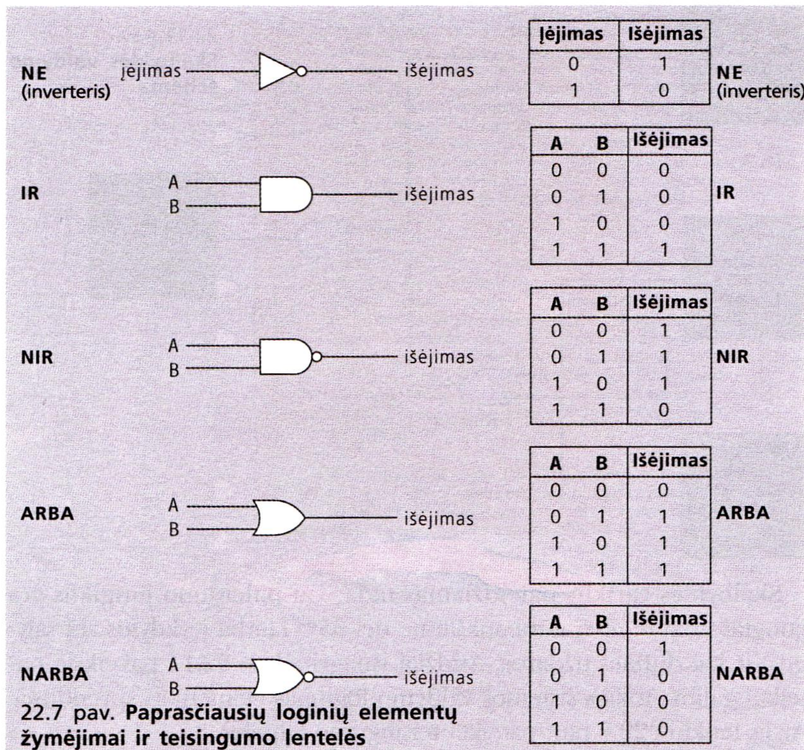
22.5 pav. **Loginių elementų pavyzdžiai mokomojoje „sprendimų" plokštėje**

Šios problemos sprendimas paprastas – tam reikalingas vienas iš grupės naudingų (ir protingų) skaitmeninių grandinių elementų, vadinamų **loginiais elementais**. Loginiai elementai yra elektroniniai elementai (22.5 pav.), „mokantys" pagal vieną ar kelis įėjimo signalus nuspręsti, koks turi būti išėjimo signalas. Paprasčiausias loginis elementas – **loginis neigimo NE elementas**, arba **inverteris**, turi tik vieną įėjimą. Kiti loginiai elementai turi du ir daugiau įėjimų.

Dabar apibendrinkime, ką sužinojome šiame skyrelyje. Išsiaiškinome, kad teisingumo lentelės nusako loginių elementų veikimą, o šių elementų įėjimas ir išėjimas priklauso nuo maitinimo šaltinio įtampos (dažniausiai 0 ir 5 V). Sutarėme, kad jei įėjime ar išėjime yra 0 V įtampa, tai įėjime arba išėjime turime



22.6 pav. **Paprasta loginio elemento su dviem įėjimais testavimo grandinė. Kai jungiklis išjungtas, A ir B įėjimų lygis žemas. Sujungus jungiklį, įėjimo signalo lygis tampa aukštu, ir įsižiebia šviesos diodo indikatorius, įjungtas loginio elemento išėjimo grandinėje**



NE (inverteris)

Įėjimas	Išėjimas
0	1
1	0

IR

A	B	Išėjimas
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

NIR

A	B	Išėjimas
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

ARBA

A	B	Išėjimas
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

NARBA

A	B	Išėjimas
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

22.7 pav. **Paprasčiausių loginių elementų žymėjimai ir teisingumo lentelės**

„žemo“ lygio būseną, o jei įėjime ar išėjime yra maždaug 5 V įtampa – tai turime „aukšto“ lygio būseną.

Ženkime dar vieną žingsnį ir žemiems bei aukštiems įtampų lygiams priskirkime dvejetainius kodus – atitinkamai 0 ir 1. 22.6 paveiksle pateikta paprasta grandinė, skirta loginiam elementui su dviem įėjimais patikrinti. Jungikliais galima perjungti kiekvieną įėjimą į aukštąjį ir žemąjį lygį.

Kai kurių loginių elementų būdingi žymėjimai ir teisingumo lentelės pateiktos 22.7 pav. Ir NARBA, ir NIR gali būti naudojami kaip NE elementai. Šiuo atveju reikia tą patį signalą prijungti prie abiejų elemento įėjimų (22.8 pav.). Sujungus du NIR elementus, gaunamas IR elementas (22.9 pav.).

Skalbyklės valdymo sistema

22.10 paveiksle pateikta šiek tiek sudėtingesnės sistemos, valdančios skalbyklės programas, blokinė schema. Įjungus kurią nors programą valdymo sistema turi pasirinkti sprendimą. Pavyzdžiui, tam tikromis sąlygomis turi būti įjungtas skalbyklės variklis; visi galimi skalbyklės veikimo variantai surašyti 22.2 lentelėje.

Variklis turi būti įjungiamas tik tada, kai durelės uždaros, *ir* kai vandens temperatūra yra aukštesnė nei 55 °C ([2] ir [3] režimai 22.2 lentelėje), arba kai temperatūros nustatymo skalėje nurodyta, kad šią skalbinių partiją galima skalbti ir žemesnėje nei 55 °C temperatūroje; šiuo atveju paleidimo jungiklis turi būti *įjungtas* (22.2 lentelėje [1] režimas).

?

C Kuris loginis elementas iš pateiktų 22.7 paveiksle gali būti naudojamas automobilio šoninių žibintų signalizacijos sistemoje?



22.8 pav. **NARBA ir NIR gali būti naudojami kaip NE elementai, kai kartu sujungiami abu jų įėjimai**



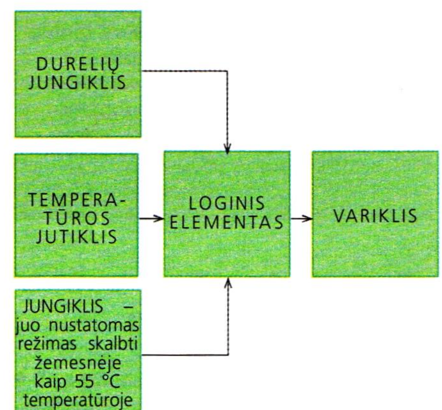
22.9 pav. **Iš dviejų NIR loginių elementų gali būti sukonstruotas IR elementas**

?

D **a)** Įrodykite, kaip iš dviejų įėjimų NIR elementų sudaryti dviejų įėjimų NARBA loginį elementą.

b) Paaiškinkite, kaip iš dviejų įėjimų NARBA elementų sudaryti dviejų įėjimų NIR loginį elementą.

■ Žr. 1–4 klausimus.



22.10 pav. **Skalbyklės valdymo sistemos blokinė schema**

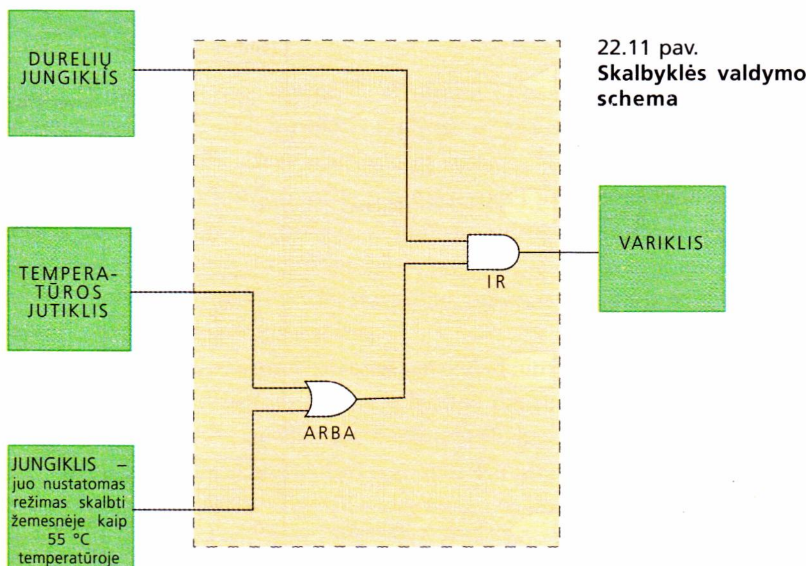
22.2 lentelė

Vandens temperatūros jutiklis	Paleidimo jungiklis	Durelės	Variklis
<55 °C	Išjungta	Atviros	Išjungta
<55 °C	Išjungta	Uždaros	Išjungta
<55 °C	Įjungta	Atviros	Išjungta
<55 °C	Įjungta	Uždaros	Įjungta [1]
>55 °C	Išjungta	Atviros	Išjungta
>55 °C	Išjungta	Uždaros	Įjungta [2]
>55 °C	Įjungta	Atviros	Išjungta
>55 °C	Įjungta	Uždaros	Įjungta [3]



E Skalbyklė sugedo, nes užstrigo šalto vandens tiekimo vožtuvas. Gamintojas sukūrė kitą modelį, kuriame šalia vožtuvo įmontuotas vandens slėgio jutiklis. Kai vanduo tiekiamas, jutiklio išėjime yra žemo lygio signalas, o nepaduodant vandens jutiklio išėjime yra aukšto lygio signalas.

Patobulinkite valdymo schemą taip, kad variklis būtų įjungiamas tada, kai vykdomos tekste aprašytos sąlygos, *ir* kai šalto vandens vožtuvas atviras.

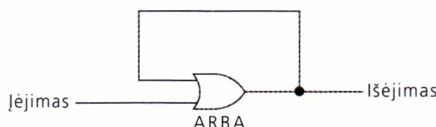


22.11 pav. **Skalbyklės valdymo schema**

Skalbyklės variklis paleidžiamas tada, kai paleidimo jungiklis yra įjungtas arba temperatūra aukštesnė nei 55 °C (arba įvykdytos abi sąlygos) ir kai durelės uždaros. Atidžiai išnagrinėkite 22.11 paveiksle pateiktą galimą tokios sistemos valdymo loginiais elementais sprendimą. Ar jis tenkina 22.7 pav. pateiktą teisingumo lentelę?

Sklendinė schema ir dviejų būsenų loginis elementas

Kai skalbyklė jau paleista, vandens temperatūra joje gali sumažėti ir žemiau 55 °C. Tada variklis būtų sustabdytas (nebent nustatytas žemesnės nei 55 °C temperatūros režimas). Tarkime, skalbyklių bandymai su įvairių tipų audiniais parodė, kad atvėsus vandeniui skalbimo kokybė nepablogėja; vanduo turi būti 55 °C temperatūros tik ciklo pradžioje. Todėl konstruktorius nusprendė grandinę patobulinti taip, kad paleistas variklis nesustotų net ir tuo atveju, kai vandens temperatūra nukrinta žemiau 55 °C. Dėl to į temperatūros jutiklio grandinę įjungiama **sklendinė schema** (22.12 pav.), kuri užtikrina, kad atidarius sklendę (t.y. paleidus variklį) ji ir toliau lieka atvira, kol variklis veikia. Atidžiau panagrinėkite pateiktą schemą ir išsiaiškinkite, kaip ji veikia.



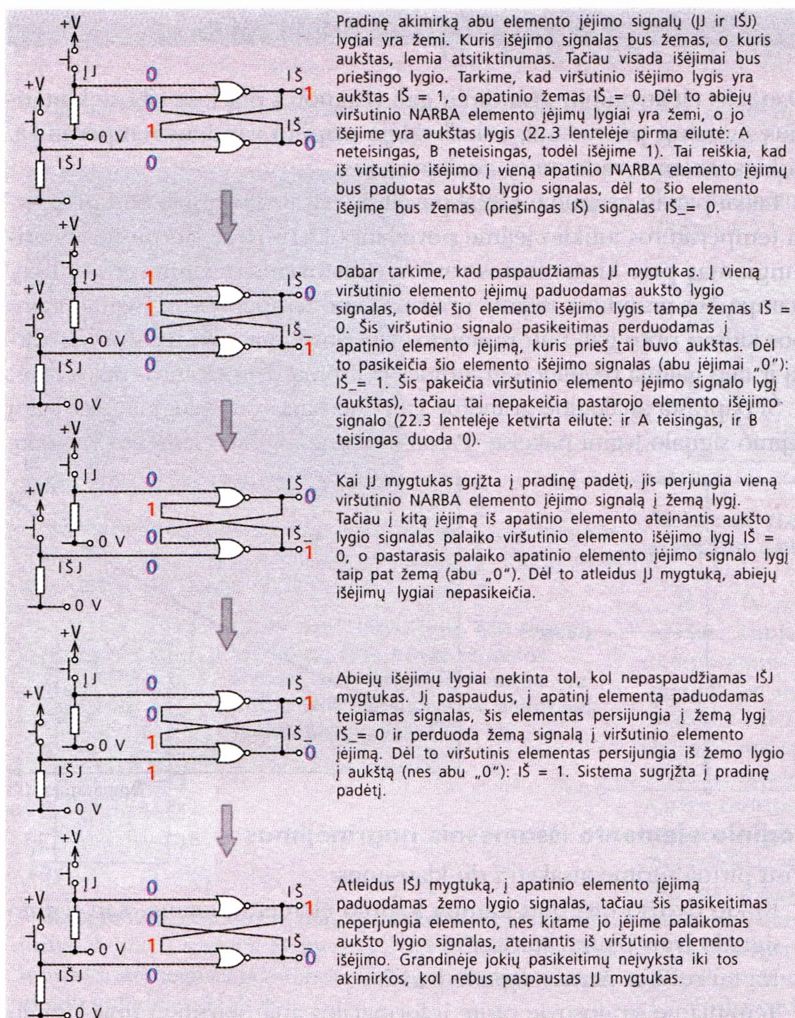
22.12 pav. **Paprasta sklendinė schema. Kai įėjimo signalo lygis pasikeičia iš žemo į aukštą, išėjimo signalas tampa aukšto lygio. Nuo šios akimirkos išėjimo signalo lygis išlieka aukštas net ir tuo atveju, jei įėjimo signalas tampa žemas**

Tačiau kai temperatūros jutiklio išėjimo signalo lygis tampa aukštas, sklendė atidaroma. Kai temperatūra sumažėja žemiau 55 °C, temperatūros jutiklio signalas tampa žemo lygio, bet sklendė vis tiek išlieka atvira net ir baigus skalbimo ciklą. Taigi turi būti galimybė baigus skalbimą atstatyti pradinę sklendės būseną.

Taip veikiančios grandinės vadinamos **dviejų būsenų** elementais. Tokį loginį elementą galima padaryti iš dviejų NARBA tipo elementų (22.13 pav.), o jo teisingumo lentelė pateikta 22.3 lentelėje.

Du dviejų būsenų elemento įėjimai pavadinti ĮJ ir IŠJ, kad būtų lengviau suprasti tokios grandinės veikimo principą, ypač tuo atveju, kai kuriamos sudėtingos valdymo sistemos. Svarbi šios grandinės ypatybė yra tai, jog prie kiekvieno elemento vieno iš įėjimų prijungiamas kito elemento išėjimas. Tokiu jungimo būdu sudaromas vadinamasis **grįžtamasis ryšys**.

Jeigu 22.13 paveiksle pavaizduoti jungikliai yra mygtukiniai, jie turi būti su grąžinančia spyruokle. Paspaudus tokį mygtuką, jis turi perjungti signalą į aukštą lygį (įjungti), o jį atleidus turi būti nustatomas pradinis žemas signalo lygis. Aišku, galima abu mygtukus laikyti nuspaustus kiek



22.13 pav. **Iš dviejų NARBA loginių elementų sudaryto dviejų būsenų elemento veikimo principas. Šis elementas turi du išėjimus, kurie čia pavadinti IŠ ir IŠ_. IŠ_ reiškia „NE IŠ". Pagal 22.4 teisingumo lentelę galite įsitikinti, kad tai visada yra teisinga. Atskiro NARBA loginio elemento teisingumo lentelė pateikta 22.3 lentelėje**

22.3 lentelė. **NARBA loginio elemento teisingumo lentelė**

A	B	Išėjimas
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

22.4 lentelė. **Dviejų būsenų loginio elemento (22.13 pav.) teisingumo lentelė**

A	B	IŠ	IŠ_
0	0	1	0
0	1	0	1
1	0	0	1
1	1	0	0
1	0	0	0

norima ilgai, o tai nėra „natūrali" jų būsena. Kuriant logines grandines stengiamasi naudotis tokiais jungikliais, kurie spustelimi ir atleidžiami.

Taigi paspaudus ĮJ mygtuką, į elementą paduodamas aukšto lygio signalas ir pasikeičia abu jo išėjimai. Atleidus mygtuką, išėjimų lygiai nepasikeičia – nuo šios akimirkos jie veikia sklendės režimu. Vos tik paspaudžiamas IŠJ mygtukas, išėjimo lygiai pasikeičia ir išlieka tokie iki pat tos akimirkos, kai paspaudžiamas ĮJ mygtukas. Atkreipkite dėmesį, kad abu išėjimai visada yra priešingų lygių (22.4 lentelė).

Patobulinta skalbyklės valdymo schema su temperatūrine sklende atvaizduota 22.14 paveiksle. Dviejų būsenų loginis elementas yra tarsi paprasta atminties ląstelė – ji įsimena savo būsenas!

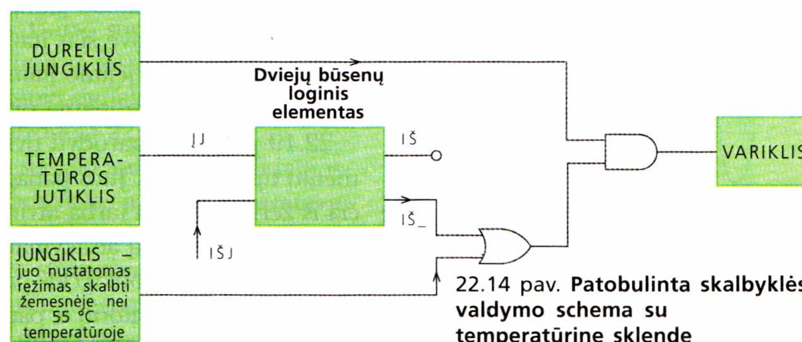
Dabar sutelkime dėmesį į patį temperatūros jutiklį. Temperatūra yra plačiose ribose kintantis parametras. Vandens temperatūra skalbyklėje gali būti lygi bet kuriai vertei intervale maždaug nuo 10 °C iki 100 °C. Naudojami įvairiausių tipų jutikliai, kurie reaguoja į temperatūros pokyčius (žr. 14.1 lent. 1-os d. 308 p.). Vienas temperatūros jutiklių pavyzdžių yra **termistorius** – tai puslaidininkinis prietaisas, kurio varža keičiantis temperatūrai kinta *tolygiai*. Taigi termistorius yra *analoginis* prietaisas.

?

F Tarkime, kad pradiniu momentu išėjimo IŠ lygis žemas, o IŠ_ lygis aukštas. Išnagrinėkite teisingumo lentelę šiuo atveju ir parodykite pasikeitimų seką. (Po pirmo žingsnio seka turi būti tokia pati!)

(Jeigu šis elementas būtų naudojamas skalbimo mašinos valdymo grandinėje, tai IŠ_ išėjimas būtų prijungtas prie ARBA elemento įėjimo.)

■ Žr. 5 klausimą.



22.14 pav. **Patobulinta skalbyklės valdymo schema su temperatūrine sklende**



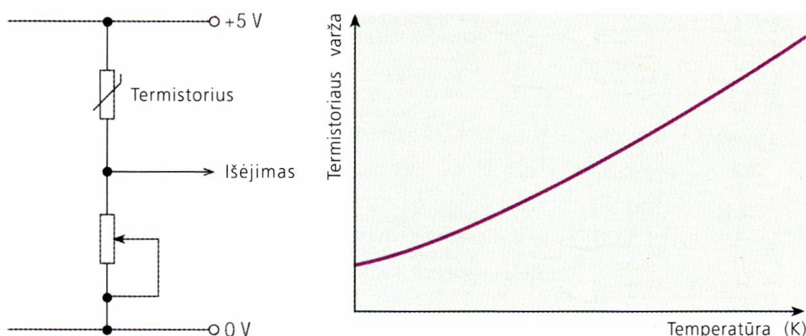
G Pateikite keturias fizikines savybes, kurios kinta panašiai kaip temperatūra. Kiekvienai iš jų pasiūlykite keitiklį arba jutiklį, kuris galėtų fizikinės savybės kitimą paversti kintamuoju elektriniu signalu.

4 ANALOGINĖS SISTEMOS

Daugelis elektroninių grandinių gali reaguoti į plačiose ribose kintančius signalus, pavyzdžiui, į skalbyklėje pripilto vandens temperatūrą. Tokios sistemos vadinamos **analoginėmis**.

Labai panaši grandinė į 22.2 paveiksle pavaizduotą gali būti pritaikyta temperatūros jutiklio įėjime poveikiui (22.15 pav.). Termistorius prijungiamas prie kintamosios varžos rezistoriaus per įtampos daliklį. Įtampa šios grandinės išėjime priklauso nuo temperatūros. Išėjimo įtampos kitimo ribos gali būti nustatytos keičiant kintamojo rezistoriaus varžą ir taip galima reguliuoti grandinės jautrumą temperatūros pokyčiams.

Ši paprasta analoginė grandinė gali būti naudojama loginių elementų įėjimo signalo lygiui pakeisti. Pasiaiškinkime loginio elemento veikimą.



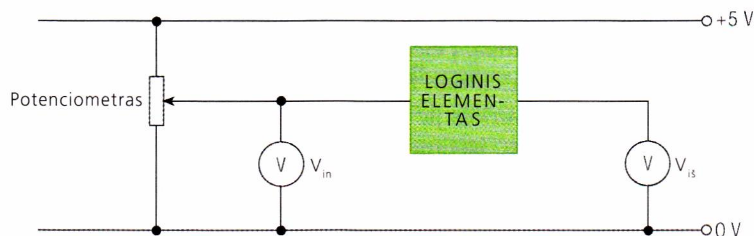
22.15 pav. **Į temperatūros pokyčius reaguojančios įėjimo grandinės pavyzdys. Šalia pateiktas termistoriaus varžos priklausomybės nuo temperatūros grafikas**

Loginio elemento išsamesnis nagrinėjimas

Visų pirma turime atsakyti į du klausimus:

- Kokio dydžio turi būti įtampa loginio elemento įėjime, kad įėjimo signalo lygis taptų „aukštas"?
- Ką tai reiškia: žemas signalo lygis?

Teminiame straipsnyje rasite informacijos apie skirtingų tipų loginių elementų šeimas. Tačiau ir 22.16 paveiksle galite rasti atsakymus.



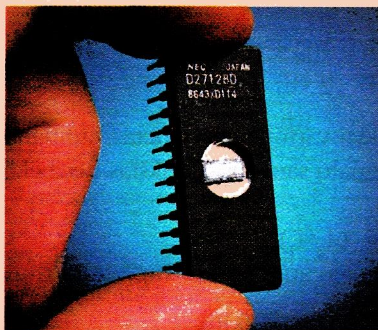
22.16 pav. **Įvairių loginių elementų amplitudinės charakteristikos (išėjimo įtampos $V_{iš}$ priklausomybė nuo įėjimo įtampos V_{in}) gali būti išmatuotos naudojant tokią schemą**

Potenciometras naudojamas įėjimo įtampai keisti nuo 0 V iki maksimalios maitinimo šaltinio įtampos vertės. Voltmetrai rodo įėjimo ir išėjimo įtampas. Išmatavę šias įtampas galime nubraižyti išėjimo įtampos priklausomybę nuo įėjimo įtampos grafiką – atsakymą į abu klausimus. Ši priklausomybė vadinama prietaiso **amplitudine charakteristika**.

22.19 paveiksle parodyti dviejų dažniausiai naudojamų loginių elementų tipų grafikai. Juos panagrinėjus matyti, kad signalo lygis pasikeičia iš žemo į aukštą (arba atvirkščiai), kai signalo įtampa pasiekia tam tikrą vertę. Iš tikrųjų atsakymai į aukščiau pateiktus klausimus yra svarbūs tik parenkant konkrečios paskirties grandinėje naudojamų elementų (rezistorių, kondensatorių ir pan.) parametrus. Skirtingų loginių elementų amplitudinės charakteristikos gali būti skirtingos.

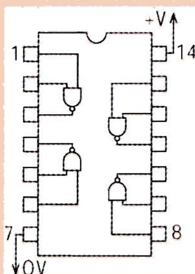
INTEGRINĖS GRANDINĖS

Loginiai elementai yra integrinių grandinių (IG), arba lustų (angliškai „chip") sudedamosios dalys.



22.17 pav. Atminties lustas

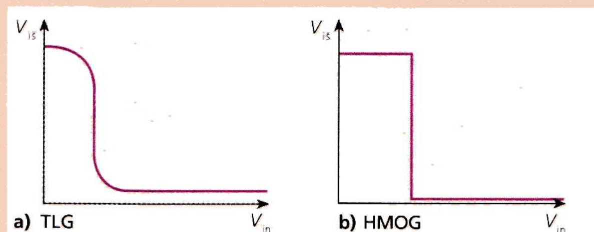
Dviejų įėjimų loginiai elementai, kuriuos nagrinėjome šiame skyriuje, dažniausiai būna sumontuoti integrinėse grandinėse po keturis (22.18 pav.)



22.18 pav. **HMOG tipo NIR loginių elementų integrinės schemos išvadų išdėstymas. Schemoje yra keturi NIR elementai su bendrais maitinimo įvadais (7 ir 14)**

Integruotose grandinėse naudojami keleto skirtingo tipo (arba „šeimų") loginiai elementai. Pagrindiniai tipai yra tranzistorinės loginės grandinės (TLG) ir hibridinės metalų oksidų grandinės (HMOG).

TLG tipo integrinės grandinės yra labai spartaus veikimo, maitinamos iš 5 V įtampos šaltinio. HMOG yra lėtesnės, tačiau jų maitinimo šaltinio įtampa gali kisti plačiose ribose nuo 3 V iki 18 V. 22.19 paveiksle pateiktos būdingos abiejų tipų loginių elementų amplitudinės charakteristikos. Kad būtų lengviau palyginti, abiem atvejais buvo naudojamas 5 V maitinimo šaltinis.



22.19 pav. **TLG** a) **ir HMOG** b) **tipo loginių elementų amplitudinės charakteristikos**

Iš 22.19 pav. grafiko aišku, kad signalo lygis tampa aukštas, kai įtampa viršija tam tikrą įtampos vertę. Jeigu temperatūros jutikliui naudojamas TLG tipo loginis elementas, tai signalo lygis esti žemas, kai jo įtampos vertė mažesnė nei 1,2 V. Įtampai nors šiek tiek viršijus šią vertę, signalo lygis tampa aukštu.

Todėl naudodamiesi jutiklio grandinėje įjungtu kintamos varžos rezistoriumi nustatome išėjimo įtampą šiek tiek žemesnę nei 1,2 V. Kai temperatūra pakyla, termistoriaus varža padidėja, atitinkamai padidėja ir įtampa tarp jo elektrodų. Šiai įtampai viršijus 1,2 V, įėjimo signalo lygis akimirksniu pakinta iš žemo į aukštą. Tuo būdu pasikeičia ir loginio elemento išėjimo signalas. Kintamuoju rezistoriumi grandinę galima sureguliuoti taip, kad termistoriaus įtampa 1,2 V ribą pasiektų esant tam tikrai temperatūrai; tai reiškia, kad jutiklis suveikia, kai vandens temperatūra pasiekia nustatytą vertę.

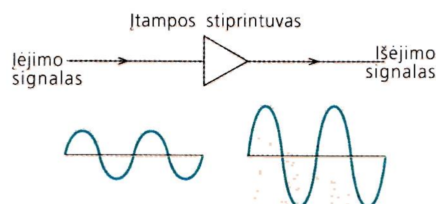
5 OPERACINIS STIPRINTUVAS

Aprašytoji grandinė visai neblogai veikia, tačiau tą patį rezultatą galima gauti ir geresniais būdais. Tarp integrinių grandinių yra grupė elementų, skirtų signalui stiprinti ir paprastai naudojamų įvairiausios paskirties schemose. Šie elementai vadinami **operaciniais stiprintuvais.** Pirmiausia panagrinėsime paprasto operacinio stiprintuvo (OS) savybes.

Paprastas stiprintuvas

Dauguma mokame naudotis garso aparatūra – pavyzdžiui, radijo imtuvais ar kompaktinių plokštelių grotuvais. Garso stiprintuvas yra viena svarbiausių visų šių prietaisų dalis. Stiprintuvas sustiprina gautą silpną signalą. Geras stiprintuvas nepakeičia garsinio signalo charakteristikų, o tik padidina signalo amplitudę, kaip pavaizduota 22.20 pav.

Į stiprintuvą įeinančio ir iš jo išeinančio signalo amplitudė gali būti išmatuota voltais, todėl stiprintuvas dažnai vadinamas **įtampos stiprintuvu.** Išėjimo signalo įtampa didesnė nei įėjimo signalo: santykis tarp išėjimo ir įėjimo signalų įtampų vadinamas stiprintuvo **stiprinimo koeficientu**. Stiprinimo koeficientas gali būti išreikštas skaičiumi (pavyzdžiui, 10 kartų) arba matuojamas decibelais, kaip aprašyta sekančiame puslapyje.



22.20 pav. **Paprasto įtampos stiprintuvo įėjimo ir išėjimo signalai**

PAVYZDYS

K Stiprintuvo įėjimo signalo maksimalus stipris yra 20 mV. Išėjimo signalo įtampos didžiausia vertė 2 V. Koks yra stiprintuvo stiprinimo koeficientas?

A Stiprinimas $= \frac{\text{įėjimo įtampa}}{\text{išėjimo įtampa}} = \frac{2\ \text{V}}{20\ \text{mV}}$

$= 100$ kartų.

Tokį stiprinimo koeficientą decibelais išreiškiame taip:

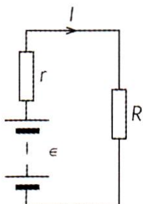
Stiprinimas $= 20 \log_{10} V_{iš} / V_{in}$

$= 20 \log_{10} 100$

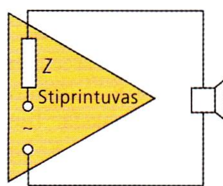
$= 20 \times 2$

$= 40$ dB

H 5 mV signalas paduodamas į stiprintuvą, kurio stiprinimo koeficientas 20 dB. Apskaičiuokite išėjimo signalo įtampą.

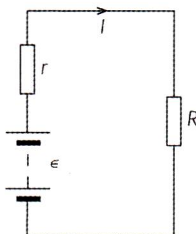


a) Baterija, kurios elektrovara ε ir vidinė varža *r*, prijungta prie apkrovos varžos *R*



b) Stiprintuvo išėjimo signalas – kintamos elektrovaros šaltinis, kurio išėjimo kompleksinė varža (impedansas) *Z*, prijungta prie apkrovos (garsiakalbio)

22.21 pav. **Analogija tarp baterijos su vidine varža ir signalo šaltinio**



22.22 pav.

Decibelas

Labai dažnai elektronikoje tenka palyginti dviejų signalų amplitudes. Tokie signalai gali būti ir stiprintuvo įėjimo bei išėjimo signalai. Neretai šie signalai skiriasi milijonus kartų, todėl lengviau ir paprasčiau naudotis logaritmine skale:

Tiesinė skalė (N)	1	10	100	1000	10000	100000
Logaritminė skalė ($\log_{10}$N)	0	1	2	3	4	5

Signalų amplitudės santykiui nusakyti vartojamas vienetas vadinamas **decibelu**. Pagal apibrėžimą dviejų signalų santykis, išreikštas decibelais, apskaičiuojamas šitaip:

$$\text{dB} = 20\log_{10}(A_2/A_1),$$

kur A_1 ir A_2 yra dviejų palyginamų signalų amplitudės. Paprastai jos matuojamos voltais.

Signalui patekus į stiprintuvą, ima tekėti elektros srovė. Srovės stipris bet kurią akimirką priklauso nuo signalo įtampos ir nuo **stiprintuvo impedanso**. Impedansas matuojamas omais (žr. 1-os d. 292 p.), todėl, kad būtų paprasčiau, galime tarti, jog tai tiesiog varža.

Stiprintuvo išėjime signalas gali būti nusakytas kaip elektros srovė, kurios stipris vėlgi priklauso nuo ją sukėlusios įtampos. Ir srovė, ir įtampa paprastai yra kintami dydžiai. Iš stiprintuvo išėjęs signalas perduodamas į kitą grandinę, arba **apkrovą**. Garso stiprintuvų apkrova dažniausiai būna garsiakalbis. Stiprintuvo išėjimo signalas elgiasi kaip signalo šaltinis: jis išėjimo grandinėje, kurioje įjungta apkrova, sukuria srovę. Kad būtų lengviau suprasti, galima įsivaizduoti stiprintuvo išėjimo signalą kaip kintamą elektrovaros šaltinį ε, kurio vidinė varža *r* (22.21 pav.) – tarsi baterija, kurios elektrovara kinta sudėtingu būdu.

Apkrova tekančios srovės stiprį sąlygoja tą srovę valdančio šaltinio, t. y. signalo, įtampa, apkrovos varža ir stiprintuvo **išėjimo impedansas**. Pasirodo, signalo šaltinis geriausiai veikia tada, kai apkrovos impedansas yra toks pats kaip stiprintuvo išėjimo impedansas.

Maksimalios galios teorija

Maksimalios galios sąvoka vartojama nuolatinės srovės grandinių teorijoje ir sėkmingai gali būti pritaikyta efektyvioms elektroninėms grandinėms.

Kaip iš maitinimo šaltinio į apkrovą perduodama energija priklauso nuo apkrovos varžos (22.22 pav.)?

Panagrinėkime du kraštutinius atvejus: kai apkrovos varža lygi nuliui ir kai apkrovos varža be galo didelė.

Kai apkrovos varža labai maža ($R = 0$), grandine tekančios srovės stiprį riboja tik vidinė paties maitinimo šaltinio varža *r*, todėl srovė pasiekia didžiausią vertę. Tačiau nuliui lygios varžos apkrovoje išsiskyrusi energija taip pat lygi nuliui. Tai reiškia, kad apkrovai energija neperduodama – tik kaista maitinimo šaltinio baterija!

Kai apkrovos varža labai didelė, ja teka labai silpna srovė. Šiuo atveju apkrovai perduotos energijos dydis taip pat labai mažas.

Taigi galima manyti, kad egzistuoja tokia apkrovos varžos vertė, kuriai esant apkrovoje išsiskyrusi energija maksimali. Raskime šią varžos vertę. Pirmiausia užrašykime šiai grandinei Omo dėsnį:

$$\epsilon = Ir + IR \text{ arba } I = \frac{\epsilon}{r+R}.$$

Apkrovoje išsiskyrusi galia W apskaičiuojama pagal tokią formulę:

$$W = I^2R = \frac{\in^2 R}{(r+R)^2}$$

Kaip matome, ji priklauso nuo apkrovos varžos $W(R)$. W bus maksimali, kai funkcijos $W(R)$ išvestinė bus lygi 0:

$$\frac{\mathrm{d}W}{\mathrm{d}R} = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}R}\left(\frac{\in^2 R}{(r+R)^2}\right) = 0$$

Apskaičiuojame išvestinę $= \dfrac{(r+R)^2 \in^2 - 2\in^2 R(r+R)}{(r+R)^4} = 0$

Lygties skaitiklį prilyginame nuliui: $(r + R)^2\in^2 - 2\in^2R(r + R) = 0$
ir suprastinę gauname: $(r + R) - 2R = 0$
Šios lygties sprendinys yra $r = R$

Tai reiškia, kad daugiausiai energijos apkrovai perduodama tada, kai apkrovos varža lygi maitinimo šaltinio vidinei varžai.

Operacinių stiprintuvų savybės

Operacinis stiprintuvas (OS) stiprina beveik idealiai. Jo charakteristikos pateiktos 22.23 paveiksle. Svarbiausios OS savybės:

?
I Kiek kartų miliamperas yra didesnis už pikoamperą?

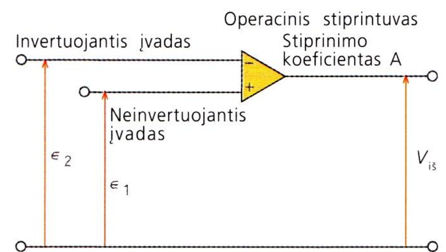
1 Tai **skirtuminiai** stiprintuvai, t. y. jie stiprina dviejų signalų skirtumą. Tokie stiprintuvai turi du įėjimus. Stiprintuvo išėjimo signalas apskaičiuojamas taip:
išėjimo signalas = stiprinimas × *skirtumas* tarp dviejų įėjimo signalų:
$$V_{\text{iš}} = A\ (\in_1 - \in_2)$$
Vienas įėjimo signalas vadinamas **neinvertuojančiu**, o kitas **invertuojančiu** (22.23 pav.).
Pavyzdžiui, jeigu $A = 10^6$, $\in_1 = 0$ V, $\in_2 = 2$ μV,
tai $V_{\text{iš}} = 10^6(0 - 2)$ μV $= -2$ V.
(Atkreipkite dėmesį, kad kai $\in_1 = 0$, išėjimo signalas yra neigiamas – sakoma, kad stiprintuvas įėjimo signalą invertuoja.)

2 Operacinių stiprintuvų stiprinimo koeficientas yra labai didelis, paprastai jis siekia 10^5–10^6, o kai kurių stiprintuvų – net 10^9. Toks stiprinimas vadinamas **atvirosios grandinės stiprinimu**.

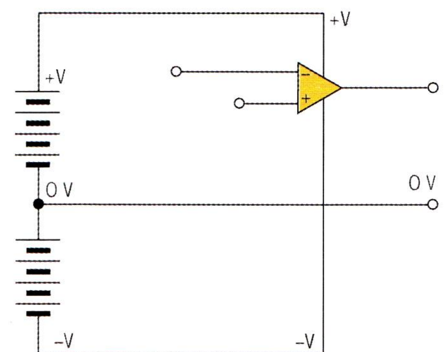
3 Visi įėjimo ir išėjimo signalai yra matuojami žemės atžvilgiu (0 V). Daugelyje operacinių stiprintuvų naudojami dvipusiai maitinimo šaltiniai. Juose įžeminimo (bendras) taškas yra maitinimo šaltinio viduryje (22.24 pav.). Maitinimo šaltinio įtampa riboja stiprintuvo išėjimo signalo įtampos dydį: $V_{\text{iš}}$ esti ne didesnė kaip ±V.

4 Stiprintuvo įėjimo srovė yra labai silpna – tokia silpna, jog kartais galima pamanyti, kad nėra jokio signalo. Tai reiškia, kad įėjimo impedansas yra labai didelis. (Tipinių operacinių stiprintuvų įėjimo srovės vertės esti mikroamperų, o neretai – ir kelių nanoamperų eilės.) Palyginimui pateiksime tokius skaičius: esant 1 mV įtampos įėjimo signalui, operacinio stiprintuvo įėjimo srovė yra maždaug 1 pA (22.25 pav.).

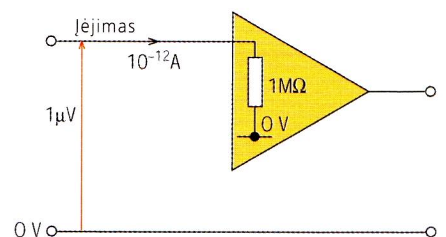
5 Operacinio stiprintuvo išėjime impedansas yra labai mažas. Tai reiškia, kad išėjime gali tekėti labai stipri, maždaug 20 mA eilės, srovė.



22.23 pav.



22.24 pav.



22.25 pav.

Operacinių stiprintuvų jungimas

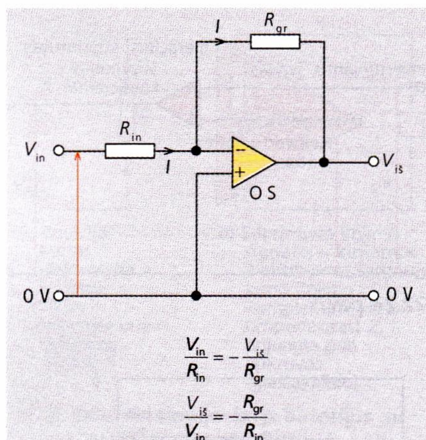
Praktiškai OS niekad nenaudojami vieni. Paprasčiausiose stiprintuvų grandinėse yra bent vienas rezistorius, kuris jungiamas tarp stiprintuvo įvado ir išvado. Tokiu rezistoriumi sukuriamas **grįžtamasis ryšys** tarp išėjimo ir įėjimo signalų. Remiantis grįžtamuoju ryšiu galima sudaryti įvairias naudingas grandines. Anksčiau aprašytuose pavyzdžiuose sukurtas **neigiamasis** grįžtamasis ryšys. Kitaip sakant, dalis išėjimo signalo paduodama į *invertuojantį* įvadą.

Invertuojantis stiprintuvas

22.26 paveiksle pateiktoje schemoje grįžtamąjį ryšį tarp OS invertuojančio įvado ir išvado sukuriančio rezistoriaus varža pažymėta R_{gr}. Įėjimo varža pažymėta R_{in}. Invertuojantis įvadas yra įžemintas, t. y. prijungtas prie gnybto su įtampa 0 V.

Jeigu šių dviejų rezistorių R_{in} ir R_{gr} varžos vienodos, tai išėjimo signalo įtampa tokia pat kaip ir įėjimo, tačiau priešingo ženklo (invertuota). Pavyzdžiui, prijungę 1 V įtampos signalą prie stiprintuvo įvado, išėjime išmatuotume –1 V įtampą. Norint išnagrinėti, kaip veikia tokia grandinė, geriausia pradėti nuo išėjimo signalo. (OS veikimo principą daug lengviau suprasti eksperimentiškai išbandžius įvairius jungimo būdus.)

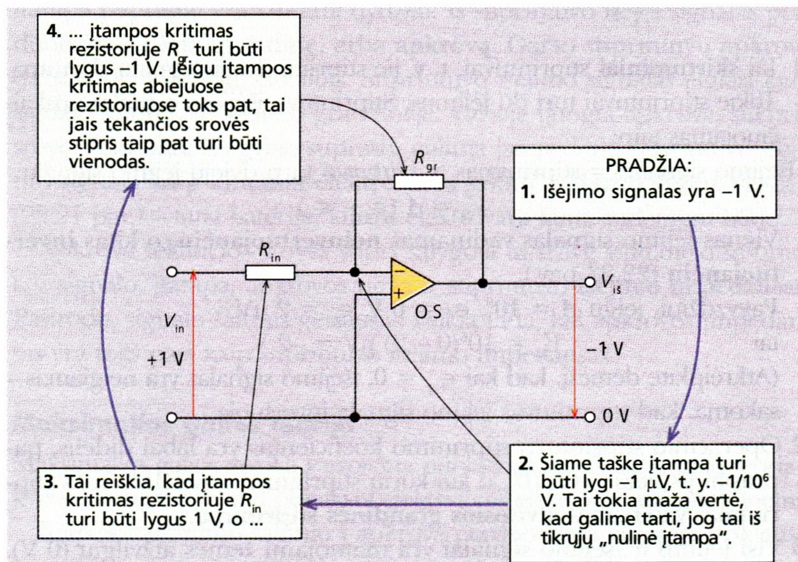
22.26 pav. **Invertuojantis stiprintuvas**



$$\frac{V_{in}}{R_{in}} = -\frac{V_{iš}}{R_{gr}}$$

$$\frac{V_{iš}}{V_{in}} = -\frac{R_{gr}}{R_{in}}$$

22.27 pav. **Invertuojantis stiprintuvas ir jo stiprinimą aprašančios lygtys**



Panagrinėkime nuosekliai sujungtus rezistorius. Operacinio stiprintuvo invertuojančio įėjimo srovė yra labai silpna palyginti su srove per du rezistorius. Taip yra ir tada, kai rezistorių varžos yra skirtingos, nes nuosekliai sujungtais rezistoriais teka ta pati srovė. Tokią grandinę aprašyti matematiškai visai paprasta (22.27 pav.).

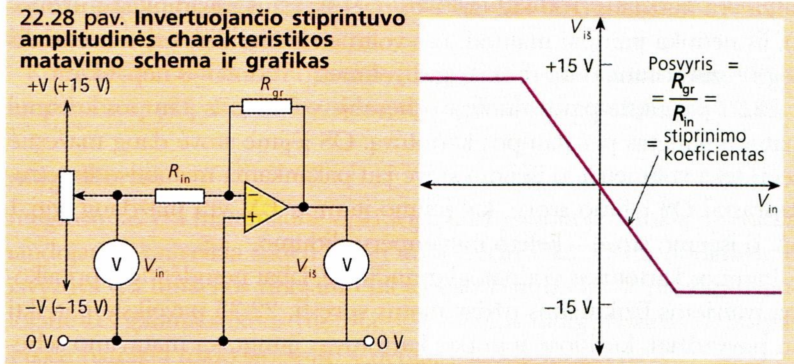
Išėjimo įtampos vertė gali būti didesnė už įėjimo įtampą kiek norima kartų – tai priklauso tik nuo rezistorių R_{in} ir R_{gr} varžų. Atkreipkite dėmesį, kad išėjimo įtampa nepriklauso nuo jokio OS parametro, tačiau grandinė be stiprintuvo neveiktų.

Jeigu grandinės stiprinimas gali būti nusakomas tikslia matematine išraiška, t.y. grandinės stiprinimo koeficientas ($V_{iš}/V_{in}$) yra pastovus, tai toks stiprinimas vadinamas **uždaros grandinės stiprinimu**.

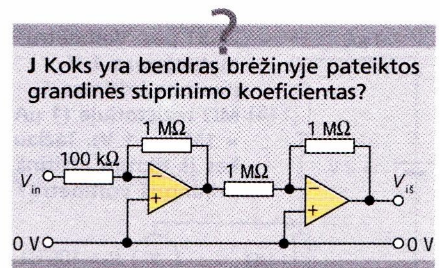
Stiprintuvo maitinimo šaltinio įtampa riboja didžiausią įmanomą stiprintuvo išėjimo įtampą. Visiškai nesvarbu, koks yra teorinis grandinės stiprinimo koeficientas – didesnio išėjimo signalo nei šaltinio įtampa ne-

gausime. Iš tikrųjų realiuose operaciniuose stiprintuvuose išėjimo įtampa paprastai esti vienu ar dviem voltais mažesnė nei šaltinio įtampa.

Pavyzdžiui, jei OS šaltinio įtampa ±15 V, tai išėjimo signalas bus ne didesnis kaip ±13 V. Dėl to ±13 V vertė yra vadinama **soties įtampa**. Ši įtampa gali būti nustatyta eksperimentiškai išmatavus **amplitudinę** OS charakteristiką (22.28 pav.). Grafiko vidurinės dalies posvyris nusako invertuojančiojo stiprintuvo stiprinimo koeficientą, R_{gr}/R_{in}.



22.28 pav. Invertuojančio stiprintuvo amplitudinės charakteristikos matavimo schema ir grafikas


J Koks yra bendras brėžinyje pateiktos grandinės stiprinimo koeficientas?

■ Žr. 6 klausimą.

Neinvertuojantis stiprintuvas

Operacinį stiprintuvą galima panaudoti grandinėje kito stiprintuvo, kuris neinvertuoja įėjimo signalo. Tokio stiprintuvo schema pateikta 22.29 paveiksle. Šioje grandinėje skirtumas tarp dviejų įėjimo signalų taip pat labai mažas; matematiniuose skaičiavimuose galima tarti, kad jis lygus nuliui.

Šiuo atveju nė vienas įvadas nėra prijungtas prie žemės (0 V). Jeigu įėjimo signalas į neinvertuojantį įvadą yra V_{in}, tai ir invertuojančiame įvade signalo įtampa lygi V_{in}.

Rezistoriai R_1 ir R_2 sudaro vadinamąjį **įtampos daliklį**. Įtampa neinvertuojančiame įvade V_{in} (22.29 pav.) šitaip susijusi su išėjimo signalu:

$$V_{in} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \times V_{iš}$$

Toks pat sąryšis galioja ir įtampai V_{in}:

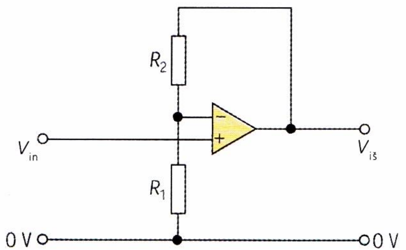
$$V_{in} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \times V_{iš}$$

Stiprintuvo stiprinimo koeficientas apskaičiuojamas šitaip:

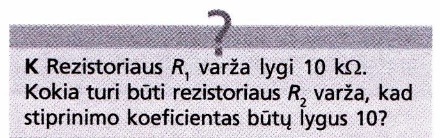
$$\frac{V_{iš}}{V_{in}} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

Kaip ir invertuojančio stiprintuvo atveju, tai uždaros grandinės stiprinimas, nes priklauso tik nuo į grandinę įjungtų rezistorių varžų.

Viena iš svarbiausių ir naudingiausių neinvertuojančiųjų stiprintuvų modifikacijų yra **įtampos kartotuvas**.



22.29 pav. **Neinvertuojantis stiprintuvas**

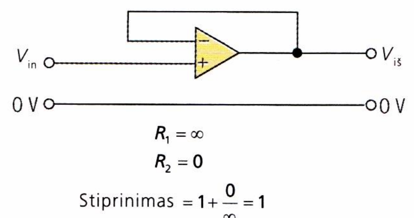

K Rezistoriaus R_1 varža lygi 10 kΩ. Kokia turi būti rezistoriaus R_2 varža, kad stiprinimo koeficientas būtų lygus 10?

Įtampos kartotuvas

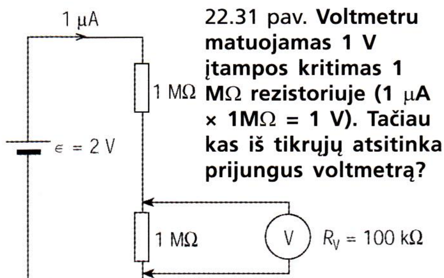
Tokio stiprintuvo schema pateikta 22.30 paveiksle. Matome, kad OS išvadas yra prijungtas tiesiai prie jo invertuojančio įvado. Kitais žodžiais tariant, rezistoriaus R_2 (22.29 pav.) varža lygi nuliui. Kito rezistoriaus R_1 grandinėje nėra. Tai tolygu be galo didelei R_1 varžai. Pasinaudojame praeitame skyrelyje gauta formule ir apskaičiuojame nagrinėjamojo stiprintuvo stiprinimo koeficientą A:

stiprinimo koeficientas = $1 + 0/\infty = 1 + 0 = 1$

Tai kuo gi naudingas stiprintuvas, kurio stiprinimo koeficientas lygus 1?

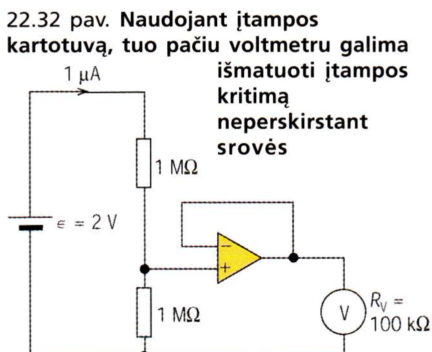


22.30 pav. **Supaprastinta įtampos kartotuvo schema (palyginkite šią schemą su 22.29 pav.)**



22.31 pav. **Voltmetru matuojamas 1 V įtampos kritimas 1 MΩ rezistoriuje (1 μA × 1MΩ = 1 V). Tačiau kas iš tikrųjų atsitinka prijungus voltmetrą?**

22.32 pav. **Naudojant įtampos kartotuvą, tuo pačiu voltmetru galima išmatuoti įtampos kritimą neperskirstant srovės**

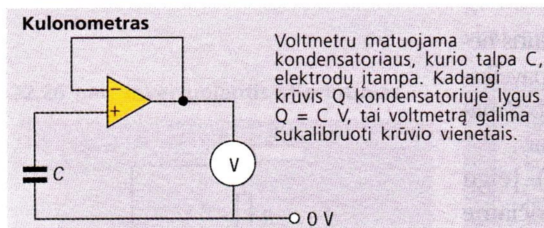


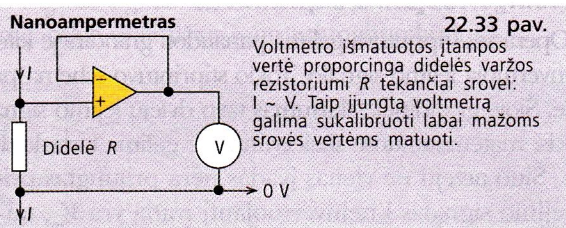
Tokios schemos gerąsias savybes sąlygoja operacinis stiprintuvas. Jo įėjimo srovė yra labai maža, o išėjimo srovė gali būti daug didesnė. Kita šios savybės formuluotė: „operacinio stiprintuvo impedansas įėjime labai didelis, o išėjime – labai mažas“. Žemiau pateiktas pavyzdys iliustruoja įtampos kartotuvo privalumus.

22.31 paveiksle pateiktoje schemoje voltmetru matuojamas 1 V įtampos kritimas 1 MΩ varžos rezistoriuje. Kadangi standartinio voltmetro varža yra maždaug 100 kΩ (žr. 1-os d. 9 skyriaus savarankišką užduotį), jis netinka įtampai matuoti, nes voltmetru teka didesnė srovės dalis negu rezistoriumi, o tai reiškia, kad voltmetro rodmenys nepatikimi.

22.32 paveiksle pavaizduotoje schemoje voltmetras įtampos kritimui matuoti įjungtas per įtampos kartotuvą. OS įėjime srovė daug mažesnė negu teka voltmetru, o išėjimo srovė jau pakankama matuoti voltmetru. Paprastai OS įėjimo srovė, kai įėjimo įtampa 1 V, yra maždaug lygi 1 pA, o išėjimo srovė – keleto miliamperų didumo.

Įtampos kartotuvas yra patogi grandinėlė, labai nesudėtingai pritaikoma įvairiems fizikiniams uždaviniams spręsti. 22.33 paveiksle pateikti du pavyzdžiai, kuriuose įtampos kartotuvas įjungtas į matavimo schemas, kuriose teka labai silpnos srovės.





22.33 pav.

Komparatorius

Operacinis stiprintuvas gali būti naudojamas kaip jungiklis. Jungiklyje neturi būti grįžtamojo ryšio, todėl du stiprintuvo įėjimo signalai gali būti skirtingi.

Stiprintuvo išėjimo signalas priklauso nuo skirtumo tarp dviejų įėjimo signalų. Tarkime, 22.34 paveiksle pavaizduotoje grandinėje OS stiprinimo koeficientas yra 10^6, įtampa neinvertuojančiame įėjime lygi 15 μV. (Invertuojančiame įėjime įtampa lygi 0 V.) Tada išėjimo signalo įtampa bus +15 V.

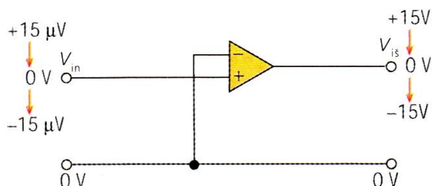
Jei įėjimo signalą sumažintume nuo 15 μV iki 0 V, tai ir išėjimo signalas taptų lygus 0 V. Jei įėjimo signalą sumažintume iki –15 μV, išėjimo signalas taptų –15 V. Tai reiškia, kad 30 μV įėjimo įtampos (0,00003 V) pokytis yra pakankamas OS išėjimui perjungti iš teigiamo impulso įtampos prie neigiamo impulso įtampos.

Dėl to OS gali būti naudojamas kaip įtampos komparatorius. 22.35 paveiksle atvaizduota tokia grandinė. Įtampos daliklis sudarytas iš termistoriaus ir pastovios varžos rezistoriaus R, nustato įtampą OS neinvertuojančiame įėjime.

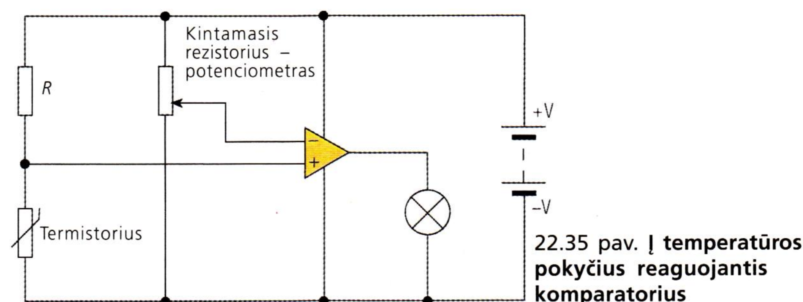
?

L Kokia srovė tekės per voltmetrą, prijungtą prie rezistoriaus 22.31 paveiksle pateiktu būdu? Užrašykite voltmetro rodomą vertę.

M Iš kur 22.32 paveiksle pateiktoje grandinėje atsiras „papildoma“ srovė?



22.34 pav. **Paprastas komparatorius – OS kaip jungiklis**



22.35 pav. **Į temperatūros pokyčius reaguojantis komparatorius**

Kylant temperatūrai, ši įtampa didėja, nes termistoriaus varža didėja. (Jei temperatūra krinta, įtampa mažėja.) Invertuojančio įvado įtampa reguliuojama kintamuoju rezistoriumi, kuris šioje grandinėje naudojamas kaip potenciometras.

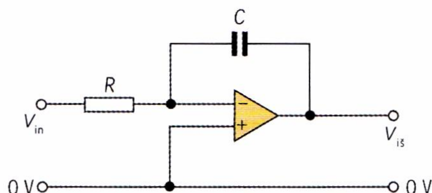
Potenciometras nustatytas taip, kad įtampa invertuojančiame įėjime būtų lygi įtampai neinvertuojančiame OS įėjime. Todėl iš pradžių stiprintuvo įėjimo įtampų skirtumas lygus nuliui, ir lemputė operacinio stiprintuvo išėjime nedega. Kai tik temperatūra padidėja, susidaro įtampų skirtumas, ir lemputė įsižiebia.

■ Žr. 7–10 klausimus.

Komparatoriai yra labai jautrūs jungikliai. Pakanka labai nedidelio temperatūros pokyčio, kad susidarytų 15 μV dydžio įtampų skirtumas.

Integratorius

Integravimas yra matematinė operacija, kuri „sumuoja“. Tokia operacija naudojama, kai reikia sudėti kokių nors verčių seką. Geras integravimo pavyzdys yra funkcijos ribojamo ploto skaičiavimas (žr. 2 priedą). Naudojant OS galima sukonstruoti beveik tobulus integratorius. 22.36 paveiksle pateikta tokio prietaiso schema.



22.36 pav. **Operacinis stiprintuvas kaip integratorius**

Integratoriaus teorija

22.36 paveiksle matyti, kad ryšys tarp OS išėjimo ir invertuojančio įėjimo sukuriamas įjungus į grandinę *C* talpos kondensatorių. Įėjimo įtampa invertuojančiam (dėl to žemiau pateiktose lygtyse yra minuso ženklas) įvadui perduodama per rezistorių *R*. Jei srovės stipris kuriame nors taške lygus *I*, o krūvis kondensatoriaus elektroduose *Q*, tai

$$V_{iš} = -\frac{Q}{C} \text{ arba } Q = -CV_{iš} \text{ ir } I = \frac{V_{in}}{R} = \frac{dQ}{dt} = \frac{d(-CV_{iš})}{dt}$$

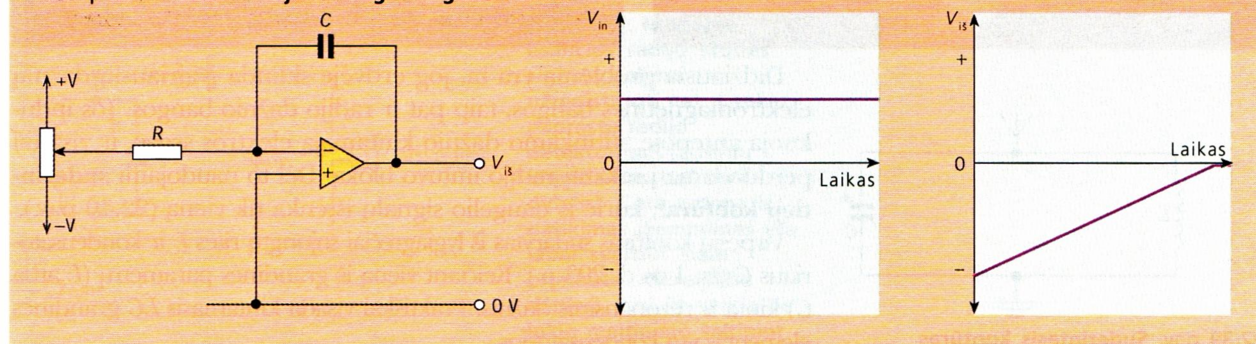
Iš čia gauname: $$\frac{V_{in}}{R} = -C\frac{dV_{iš}}{dt}$$

Šį reiškinį pertvarkome: $dV_{iš} = -\frac{1}{RC}V_{in}dt$

ir suintegravę gauname OS išėjimo signalą: $V_{iš} = -\frac{1}{RC}\int V_{in}dt$.

Vienas iš populiaresnių integratoriaus taikymų yra **tiesiškai didėjančios funkcijos generatorius** (22.37 pav.). Pateiktoje schemoje matyti, kad įėjimo signalo įtampa yra pastovi, o išėjimo signalo įtampa didėja tiesiškai. Didėjimo greitis priklauso nuo įėjimo signalo įtampos, kurį galima reguliuoti įėjimo grandinėje įjungtu potenciometru.

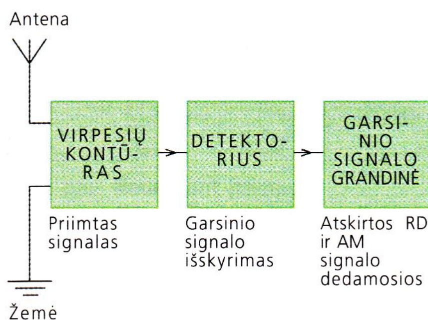
22.37 pav. **Tiesiškai didėjančio signalo generatorius**



6 RADIJO IMTUVAI

Skyriaus pabaigoje išnagrinėsime nesudėtingą radijo imtuvą, skirtą amplitudinės moduliacijos (AM) signalams priimti. Pirmiausia prisiminkime, kad siųstuve tam tikru būdu sujungus garso ir radijo dažnio nešantįjį signalus gaunamas AM signalas (AM signalų siųstuvo blokinė schema pateikta 21.2 pav., 134 p.). Šį moduliuotą signalą siųstuvas išspinduliuoja.

Radijo imtuvas priima signalą ir įvykdo atvirkščią veiksmą: iš pradžių demoduliuoja signalą, po to išskiria iš jo garsinį signalą, tada jį sustiprina ir nukreipia į garsiakalbį. Svarbiausios radijo imtuvo funkcinės dalys pavaizduotos 22.38 paveiksle pateiktoje blokinėje schemoje.



22.38 pav. **AM imtuvo blokinė schema**

Siųstuvo išspinduliuotas radijo signalas sklinda kaip elektromagnetinės bangos. Jos sukelia imtuvo antenoje krūvių judėjimą (srovės tekėjimą), kuris ir perduodamas kitai imtuvo grandžiai kaip įėjimo signalas. Dėl to net paprasčiausia tiesaus laido atkarpa yra visai nebloga antena; daugelyje radijo imtuvų naudojamos teleskopinės (sustumiamos) antenos.

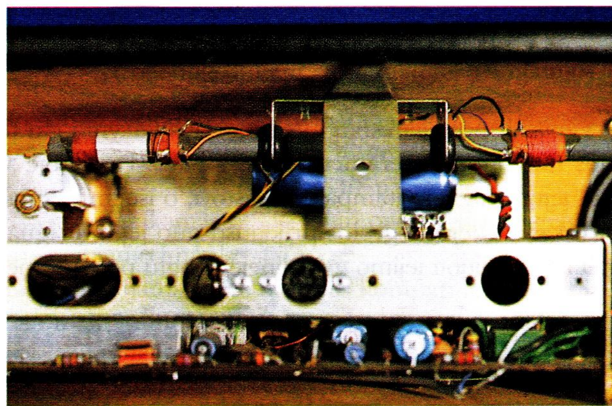
Elektromagnetinės bangos ir antenos

Elektromagnetinė banga sudaryta iš dviejų dedamųjų: elektrinės ir magnetinės. Vieno tipo antenos reaguoja į elektrinio lauko, kito tipo – į magnetinio lauko svyravimus (22.39 pav.). Kai anteną pasiekia radijo signalas, antenoje esantys laisvieji elektronai pradeda svyruoti apie pusiausvyros padėtis elektromagnetinės (radijo) bangos dažniu, o tai reiškia, kad sužadinama tokiu pat dažniu kintanti elektros srovė. Taigi elektronų judėjimą antenoje šiuo atveju sąlygoja *elektrinė* radijo bangos dedamoji (žr. 16.3 pav., 7 p.).

Daugelyje radijo imtuvų, veikiančių vidutinių ir ilgųjų radijo bangų diapazonuose, naudojamos feritinės antenos. Tokia antena sudaryta iš feritinio strypelio, ant kurio užmauta viena ar kelios ritės. Šio tipo antenose elektronų judėjimą sąlygoja magnetinė radijo bangos dedamoji, nes kintamasis magnetinis laukas sužadina ritėje elektros srovę. Feritinis strypelis yra tokia medžiaga, kurioje susikoncentruoja magnetinio lauko linijos, todėl ritės skerspjūvyje susidaro stipresnis magnetinis laukas.

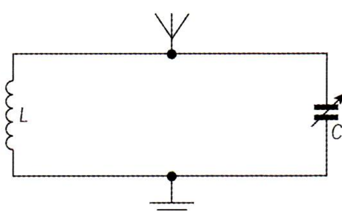
22.39 pav. **Kairėje: Radijo imtuvas su laidine antena priima radijo bangų elektrinio lauko dedamąją**
Dešinėje: Radijo imtuvas su feritine antena išskiria magnetinio lauko dedamąją





Didžiausia problema yra ta, jog erdvėje sklinda įvairiausių dažnių elektromagnetinės bangos, taip pat ir radijo dažnio bangos. Jos indukuoja antenoje atitinkamo dažnio kintamąją elektros srovę, ir visa tai perduodama į sekantį radijo imtuvo bloką. Dėl to naudojami **suderintieji kontūrai**, kurie iš daugelio signalų išrenka tik vieną (22.40 pav.).

Virpesių kontūras sudarytas iš lygiagrečiai sujungtų ritės L ir kondensatoriaus C (žr. 1-os d. 293 p.). Keičiant vieną iš grandinės parametrų (L arba C) kinta ir rezonansinis dažnis. Praktiškai visada kintamasis LC grandinės elementas yra kondensatorius.



22.39 pav. **Suderintasis kontūras**

Jei rezonansinis dažnis atitinka iš antenos atsklidusio signalo dažnį, tai toks signalas praeina per *LC* grandinę. Tuo būdu virpesių kontūras veikia kaip filtras, praleidžiantis tik siauros dažnių srities virpesius.

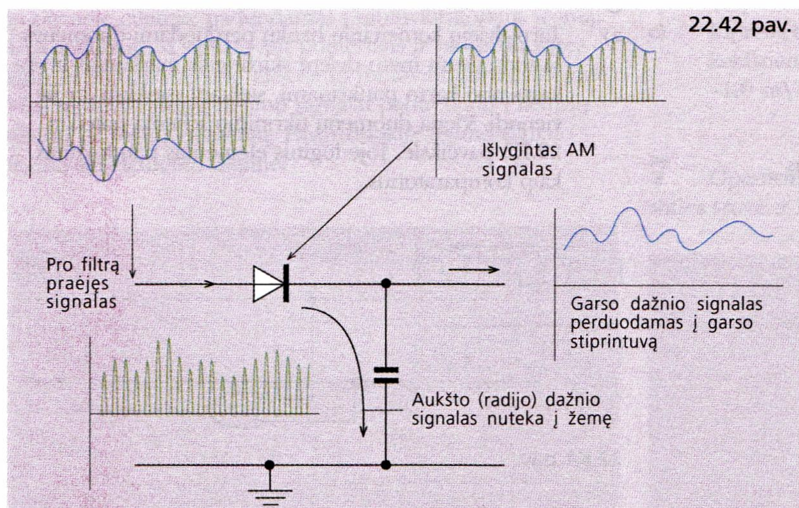
„Idealus" virpesių kontūras turi praleisti tik vieno dažnio signalą. Tokiu atveju radijo signalas būtų be trikdžių, be jokių sąveikos su kitais signalais sukeltų trikdžių. Tačiau iš tikrųjų virpesių kontūras turi praleisti dažnių juostą, kurioje telpa visas AM signalas (žr. 135 p.).

Paprastai radijo imtuvai gerai įžeminami nereikalingiems signalams ar jų dedamosioms nutekėti. Atkreipkite dėmesį, kad „įžeminimas" reiškia gerą sujungimą su žeme, o ne maitinimo šaltinio nulinį gnybtą.

Tolesnis radijo imtuvo blokas **demoduliuoja** išskirtą signalą. Labai paprastas ir efektyvus demoduliatorius gali būti pagamintas iš diodo ir kondensatoriaus (22.42 pav.). Diodas išlygina signalą, t.y. leidžia srovei tekėti viena kryptimi. Tačiau diodo išlygintas signalas vis dar sudarytas iš dviejų signalų: garsinio ir nešančiojo dažnio.

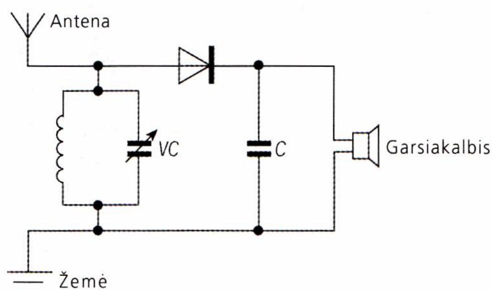
Kondensatorius parenkamas toks, kad turėtų mažą reaktyvinę varžą radijo dažnio svyravimams, tačiau didelę garsinio dažnio signalui. Dėl to kondensatorius praleidžia radijo dažnio signalą, kuris nuteka į žemę (22.42 pav.). Žemesnio dažnio signalo, t. y. garso signalo kondensatorius nepraleidžia, todėl jis perduodamas į sekantį radijo imtuvo bloką.

Išskirtas garsinis signalas dar yra per silpnas, kad galėtų sužadinti garsiakalbį, todėl jį būtina sustiprinti **garso stiprintuvu**.



22.42 pav.

Garso stiprintuvas, arba žemo dažnio stiprintuvas, skirtas garsinio dažnio signalams stiprinti. Geras stiprintuvas turi vienodai stiprinti visus garsinio dažnio signalus, kurie yra intervale nuo 20 Hz iki 20 kHz. Tačiau paprastuose radijo imtuvuose tai nebūtina. Visiškai paprastos konstrukcijos veikiančio radijo imtuvo schema pateikta 22.43 paveiksle.

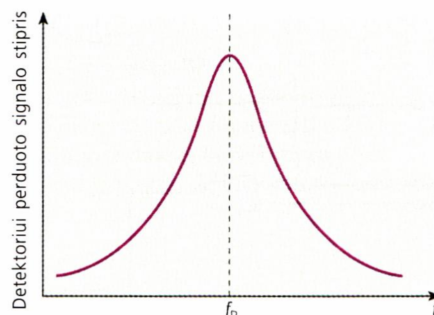


22.43 pav. **Netoliese esančios radijo stoties signalą galima užregistruoti net ir tokiu paprastu radijo detektoriumi (ausinių impedansas turi būti didelis). Gera antena ir patikimas įžeminimas yra labai svarbūs šiam prietaisui. Atkreipkite dėmesį, kad jis veikia be jokio maitinimo šaltinio!**

Prisiminkite 13 skyriuje pateiktą *LC* kontūro rezonansinio dažnio formulę:

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{LC}}$$

N Kintamojo kondensatoriaus talpa gali būti keičiama intervale nuo 200 pF iki 500 pF. Kondensatorius naudojamas radijo imtuvui, veikiančiam vidutinių bangų diapazone nuo 0,5 MHz iki 1,5 MHZ, suderinti. Apskaičiuokite, koks turi būti ritės induktyvumas, kad imtuvas galėtų priimti bet kurios nurodytame diapazone veikiančios radijo stoties signalus.



22.41 pav. ***LC* kontūro rezonansinė kreivė**

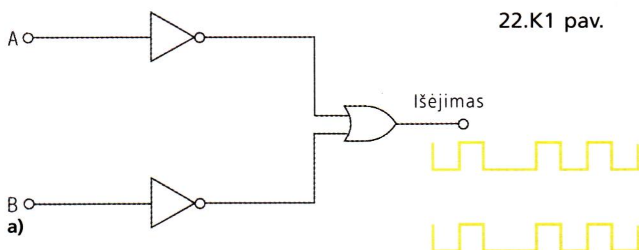
SANTRAUKA

Išnagrinėję šį skyrių turėtumėte:

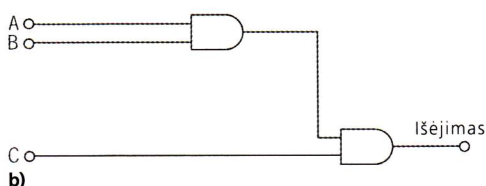
- Žinoti, kad bet kokią elektroninę sistemą sudaro trys blokai: įėjimo blokas, apdorojimo blokas ir išėjimo blokas.
- Suprasti keitiklio ir jutiklio sąvokas.
- Žinoti, kad yra dvejopi elektroniniai prietaisai: analoginiai ir skaitmeniniai.
- Gebėti naudotis teisingumo lentelėmis skaitmeninių sistemų analizei.
- Suprasti loginių elementų veikimo principą ir sudėtingų loginių grandinių jungimo metodus.
- Suprasti, kas tai yra operacinis stiprintuvas, invertuojantis stiprintuvas ir neinvertuojantis stiprintuvas.
- Suprasti radijo imtuvo veikimą.

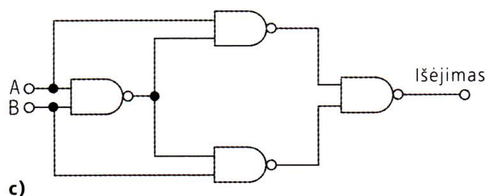
KLAUSIMAI

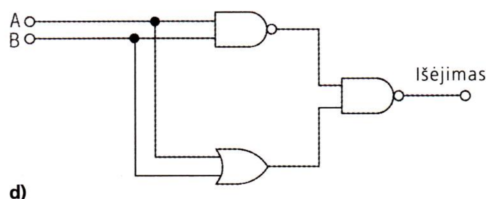
1 Aprašykite 22.K1 paveiksle pateiktų loginių grandinių funkcijas. (Patarimas: pirmiausia kiekvienai grandinei užpildykite teisingumo lentelę.)



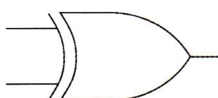
22.K1 pav.







2 Loginis disjunkcijos (išskirties) elementas ARBA pavaizduotas 22.K2a) paveiksle, o šalia pateikta jo teisingumo lentelė (22.K2b)).



Įėjimai		Išėjimas
A	B	
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

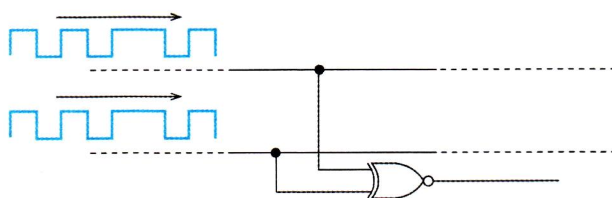
a) Sukonstruokite loginį išskirties (disjunkcijos) elementą ARBA iš dviejų įėjimų IR ir NARBA loginių elementų.

b) Sukonstruokite išskirties ARBA loginį elementą tik iš NARBA elementų. Kiek mažiausiai tokių elementų reikia sujungti?

c) Atsakykite į **b)** klausimą naudodami NIR loginius elementus. Kiek mažiausiai tokių elementų reikia sujungti?

3

a) Tarp dviejų komercinių bankų perduodami duomenys sklinda vienu metu dviem skirtingais maršrutais ir yra karts nuo karto patikrinami, siekiant įsitikinti, ar jie vienodi. Viena duomenų tikrinimo schema pateikta 22.K3 paveiksle. Joje loginis elementas naudojamas kaip komparatorius.


22.K3 pav.

(i) Užpildykite palyginamų įėjimo signalų ir komparatoriaus išėjimo signalo teisingumo lentelę.

(ii) Pavaizduokite komparatoriaus išėjimo signalą, kai sklindančių impulsų sekos (22.K3 pav.) yra vienodos.

b) Parodykite, kaip naudojant NIR elementus galima atlikti tokią pačią funkciją kaip ir su komparatoriumi, pateiktu 22.K3 paveiksle.

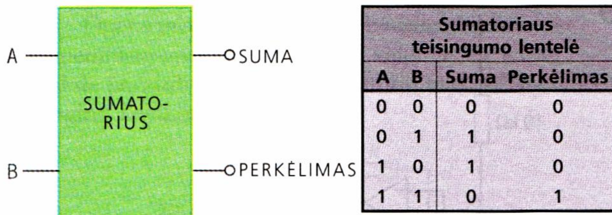
4 Jums reikia sujungti loginę schemą, kuri galėtų sudėti du dvejetainius skaičius. Dvejetainės aritmetikos taisyklės yra tokios:

$0 + 0 = 0$

$0 + 1 = 1 + 0 = 1$ perkeliant 0

$1 + 1 = 10$, t.y. 0 perkeliant 1

Tokio sumatoriaus teisingumo lentelė ir blokinė schema pateikta 22.K4 paveiksle.

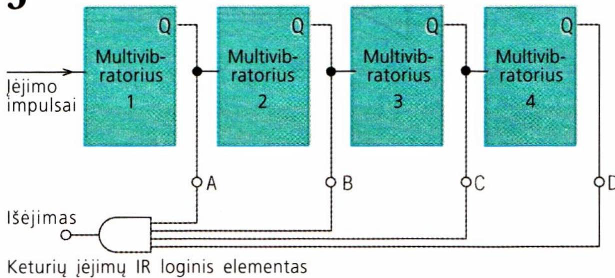


Sumatoriaus teisingumo lentelė			
A	B	Suma	Perkėlimas
0	0	0	0
0	1	1	0
1	0	1	0
1	1	0	1

22.K4 pav.

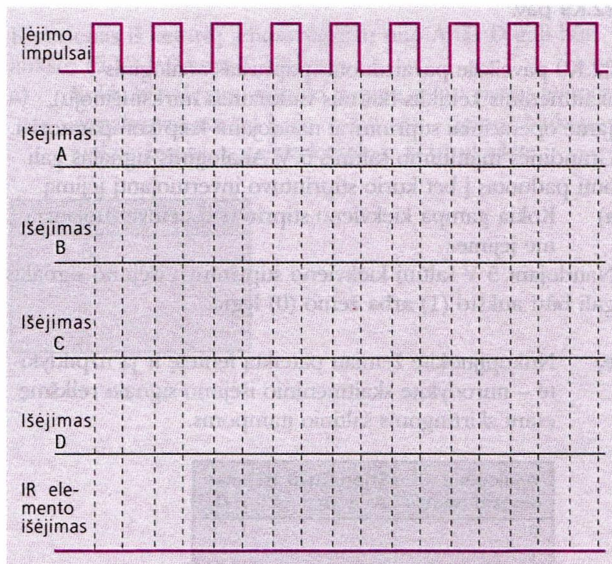
Su kokiais loginiais elementais galima sukurti tokią schemą?

5



22.K5a) pav.

Stačiakampės formos impulsas, parodytas 22.K5b) paveikslo pirmoje eilutėje, paduodamas į multivibratoriaus įėjimą. Nukopijuokite šį signalą ant popieriaus ir pavaizduokite, kaip šis signalas atrodo kiekvieno multivibratoriaus išėjime. Visų multivibratorių išėjimo signalai paduodami į keturių įėjimų IR loginį elementą. Pavaizduokite įėjimo signalo formą šio elemento išėjime.

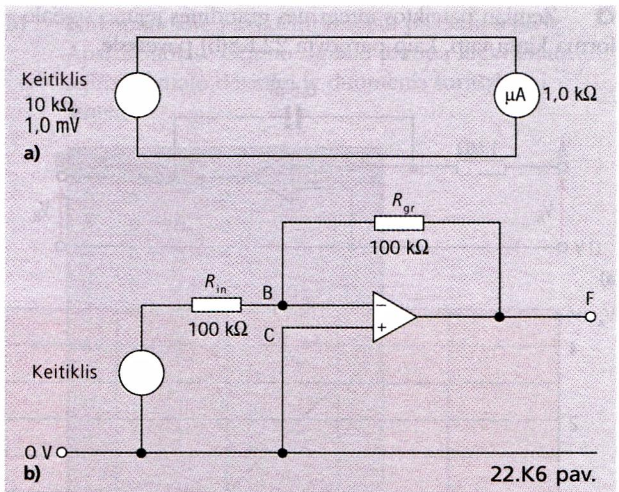


22.K5b) pav.

6

Elektroninio prietaiso, kontroliuojančio gamybos sąlygas, vidinė varža 10 kΩ, jis generuoja 1,0 mV elektrovarą.

a) Keitiklis prijungtas prie 1 kΩ varžos mikroampermetro (22.K6a)). Apskaičiuokite srovės stiprį keitiklio



22.K6 pav.

grandinėje ir įtampos kritimą pačiame mikroampermetre.

b) Keitiklis įjungiamas į OS grandinę, kaip parodyta 22.K6b) paveiksle. Tarkime, kad OS šioje grandinėje veikia „tobulai".

(i) Kokia įtampa yra taške B?

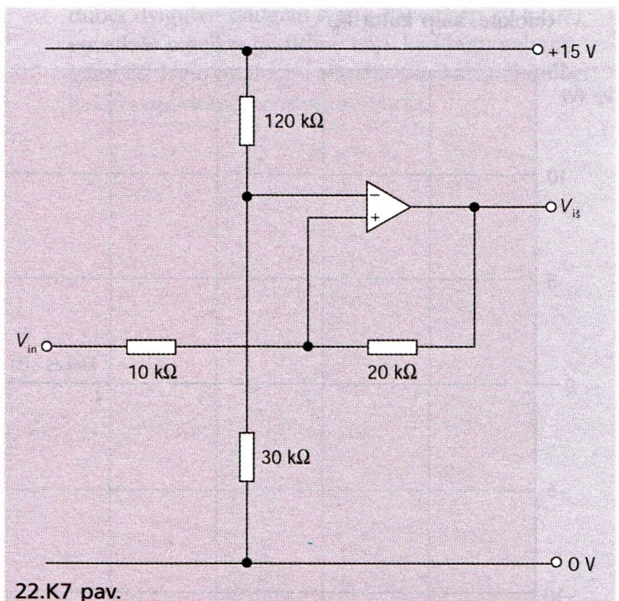
(ii) Kokia srovė teka per įėjimo rezistorių R_{in}?

(iii) Kokia yra išėjimo signalo įtampa taške F?

c) Ką reikėtų pakeisti grandinėje, kurios stiprintuvo koeficientas –1, kad gautume išėjimo įtampą taške F –1,0 mV?

7

Operacinio stiprintuvo, pavaizduoto 22.K7 pav., soties srovė ±13 V.



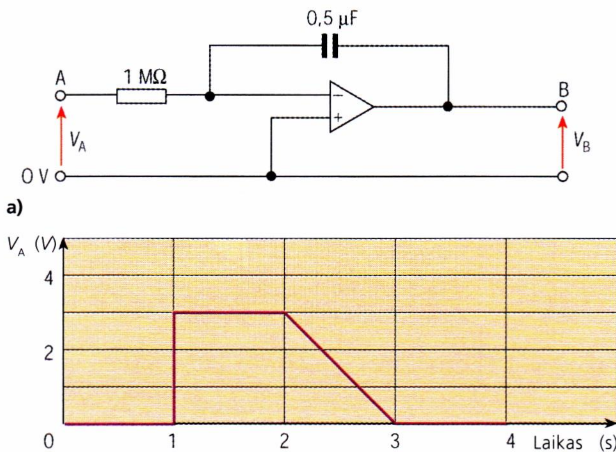
22.K7 pav.

a) Kokia įtampa invertuojančiame OS įėjime?

b) Koks turi būti įėjimo signalo pokytis, kad stiprintuvo išėjimo signalas pasikeistų nuo –13 V iki +13 V?

c) Kokia įėjimo įtampa sugrąžintų pradinę išėjimo signalo įtampos vertę, t. y., nuo +13 V iki –13 V?

8 Žemiau pateiktos integrinės grandinės įėjimo signalo forma kinta taip, kaip parodyta 22.K8(b) paveiksle.



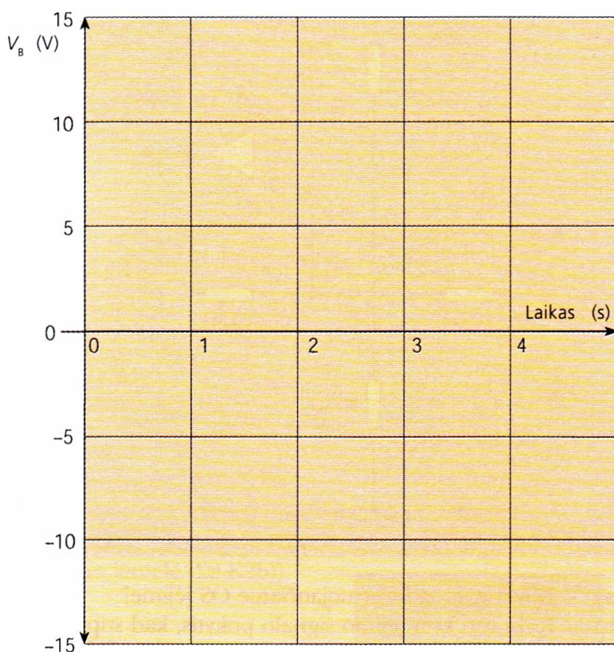
22.K8 pav.

a) Įjungimo momentu išėjimo signalo V_B įtampa yra lygi 0. Įrodykite, kad V_B vertė laiko momentu t = 2 s yra 6 V.

b) Nukopijuokite į sąsiuvinį pateiktą lentelę ir ją užpildykite – apskaičiuokite įtampos V_B reikšmes nurodytais momentais.
Tarkite, kad OS neįsistotina.

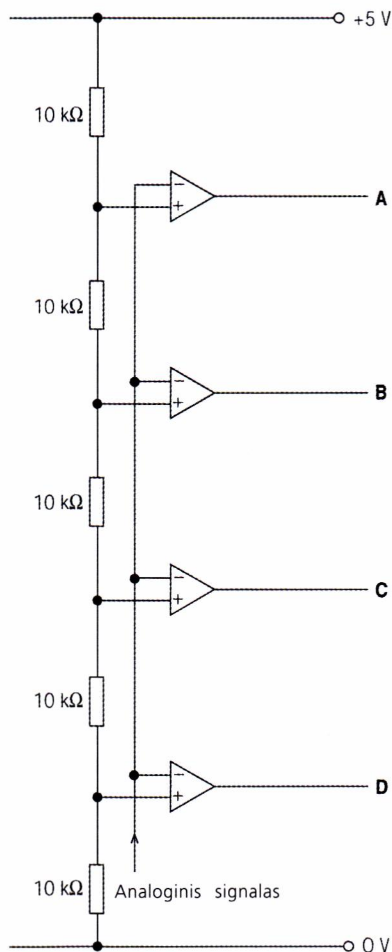
Laikas (s)	0	1	2	3	4
V_B (V)	0		6		

c) Nukopijuokite 22.K8 paveiksle pateiktą grafiką. Naudodamiesi savo skaičiavimų rezultatais pavaizduokite, kaip kinta V_B.



22.K8c) pav.

9



22.K9 pav.

22.K9 paveiksle pavaizduotas paprastas analoginis–skaitmeninis keitiklis (kartais vadinamas mirksinčiuoju). Jame operaciniai stiprintuvai naudojami kaip komparatoriai. Grandinės maitinimo šaltinis 5 V. Analoginis signalas gali būti paduotas į bet kurio stiprintuvo invertuojantį įėjimą.

a) Kokia įtampa kiekvieno stiprintuvo neinvertuojančiame įėjime?

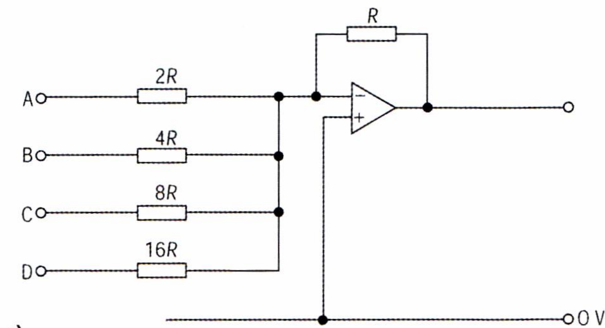
Naudojant 5 V šaltinį kiekvieno stiprintuvo išėjimo signalas gali būti aukšto (1) arba žemo (0) lygio.

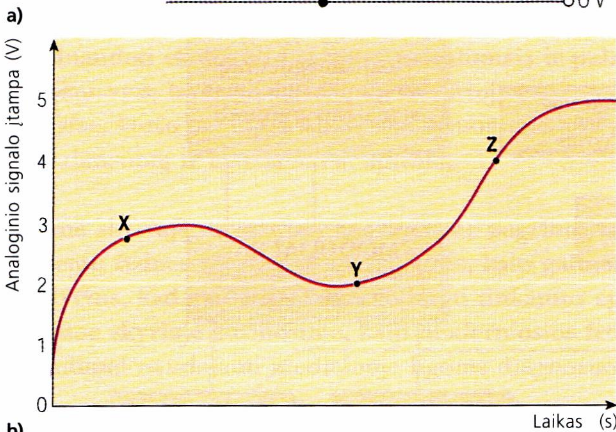
b) Nukopijuokite žemiau pateiktą lentelę ir ją užpildykite – nurodykite skaitmeninio išėjimo signalo reikšmę esant skirtingoms šaltinio įtampoms.

Analoginio signalo įtampa	Stiprintuvo išėjimas A	B	C	D
0				
1				
2				
3				
4				

c) Kokia įtampa bus stiprintuvų išėjimuose, jei analoginio įėjimo signalo įtampa lygi **(i)** 1,5 V, **(ii)** 4,5 V?

10 Operacinis stiprintuvas gali būti naudojamas skaitmeniniam-analoginiam signalų keitimui. 22.K10a) paveiksle pavaizduotas paprastas keturių bitų skaitmeninis-analoginis keitiklis.





22.K10 pav.

Kiekvienas iš keturių įėjimo signalų nuo A iki D gali būti aukšto (5 V) ir žemo (0 V) lygio.

a) Kokia bus išėjimo signalo įtampa, jeigu vienas įėjimo signalas yra aukšto lygio, o kiti trys – žemo? Nukopijuokite žemiau pateiktą lentelę ir ją užpildykite.

Aukštas lygis	Išėjimas
A	
B	
C	
D	

b) Nukopijuokite į sąsiuvinį žemiau pateiktą lentelę. Apskaičiuokite išėjimo signalo įtampą kiekvienam įėjimo signalo deriniui ir duomenis surašykite į lentelę.

Įėjimas				Išėjimas (V)
A	B	C	D	
0	0	0	0	
0	0	0	1	
0	0	1	0	
0	0	1	1	
0	1	0	0	
0	1	0	1	
0	1	1	0	
0	1	1	1	
1	0	0	0	
1	0	0	1	
1	0	1	0	
1	0	1	1	
1	1	0	0	
1	1	0	1	
1	1	1	0	
1	1	1	1	

Pateikta grandinė paverčia skaitmeninį signalą į 16 skirtingų lygių analoginį signalą.

c) Signalas, pavaizduotas 20.K10b) grafike, yra gautas 22.K10a) paveiksle pateiktoje grandinėje. Koks yra taškus X, Y ir Z atitinkantis skaitmeninis įėjimo signalas?

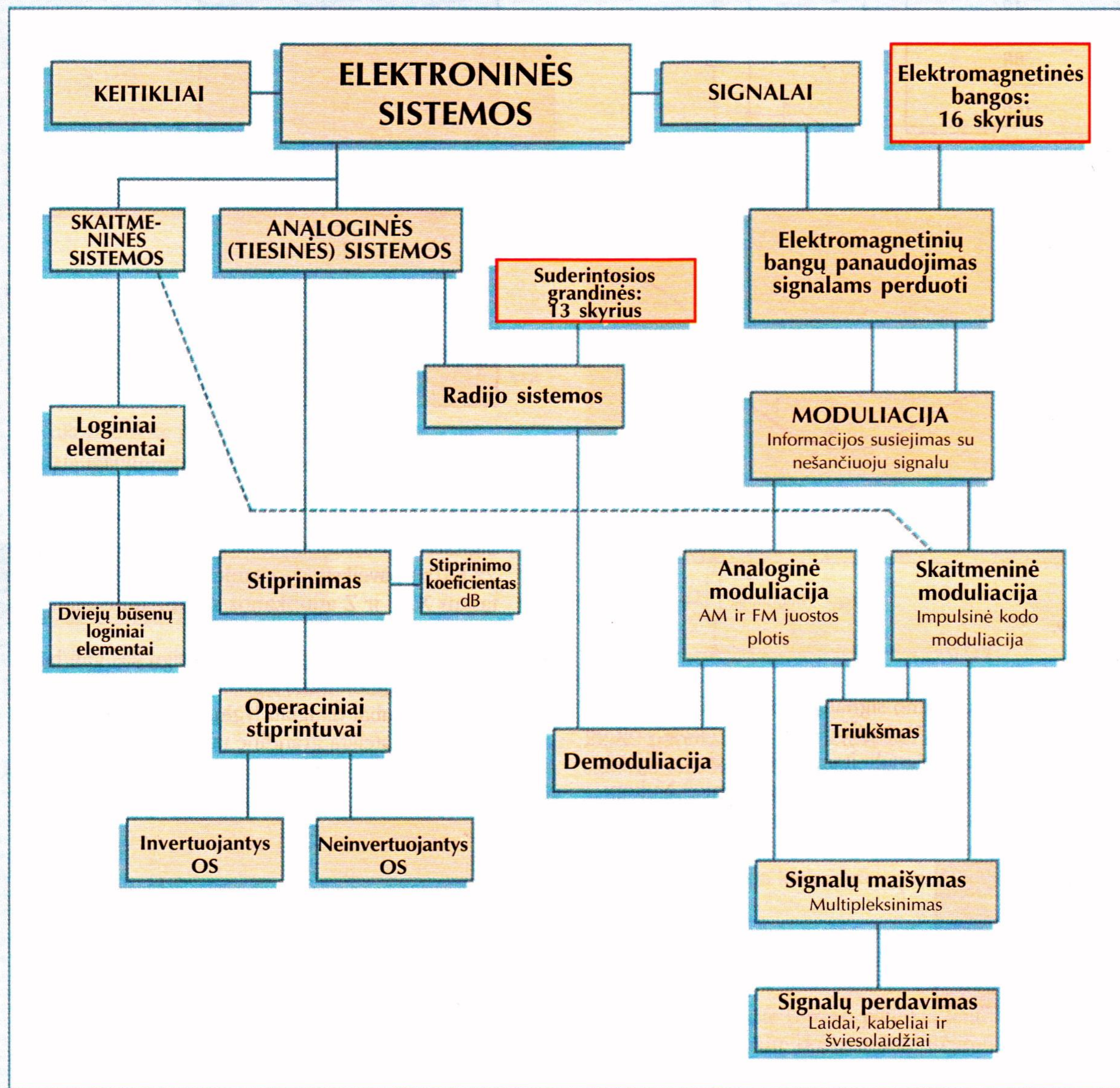
d) „Glotnesnis" analoginis išėjimo signalas gali būti gautas iš skaitmeninio signalo, kuriame būtų užkoduota dvigubai daugiau lygių. Pakeiskite 20.K10a) paveiksle pateiktą grandinę taip, kad būtų galima gauti 32 lygių analoginį signalą. Apskaičiuokite bet kokio papildomo rezistoriaus varžą.

ELEKTRONIKA

Žemiau pateiktoje skyriaus schemoje pateiktos svarbiausios idėjos ir jų taikymo sritys, kurios buvo aptartos **21** skyriuje **Komunikacija ir ryšiai** ir **22** skyriuje **Fizikinė elektronika**. Schema atspindi skirtingų sąvokų ryšius ir priklausomybes.

Jums būtų pravartu šiuose skyriuose pateiktą medžiagą įtvirtinti praktine patirtimi – tada geriau suprastumėte teoriją, kuria pagrįsti šiuolaikiniai elektronikos taikymai.

Pagal šią schemą jūs išsiaiškinsite klausimus, kurie yra įtraukti į mokymosi programą, taip pat pasitikrinsite, kurias sritis jums galbūt reikia pakartoti.



ŽMONIŲ PLANETOS FIZIKA

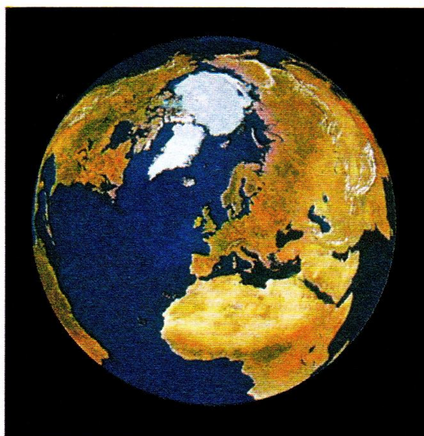


Žemėje susiklosčiusios fizinės sąlygos nulėmė gyvybės atsiradimą joje. Mes, žmonės, naudojamės Žemės ištekliais – kuru, derlingomis žemėmis, vandeniu, Žemė priima netgi mūsų atliekas. Todėl privalome užtikrinti, kad mūsų veikla nepakeis nepataisomai Žemės fizinio pasaulio ir gyvosios gamtos.

Turime teisingai pasirinkti, kaip gyventi: per trumpą laiką nerūpestingai išeikvoti išteklius, kurie nėra begaliniai, arba pasinaudoti ekologinių sistemų privalumais ir palaikyti stabilią pusiausvyrą tarp mūsų reikmių ir vartojamų Žemės išteklių. Tikslas, kurio turėtų siekti sveika visuomenė, yra sukurti subalansuotą ir atsistatančią aplinką.

Šiame skyriuje pirmiausia nagrinėsime pagrindines Žemės ir jos sistemų fizines savybes, išsiaiškinsime, kaip galima stebėti jų pokyčius, kad galėtume laiku padaryti tinkamus sprendimus. Kitame skyriuje sužinosime, kaip moderniosios fizikos metodai ir atradimai naudojami medicinoje ligoms diagnozuoti ir gydyti.

23 Žemė ir atmosfera



Spėjimas, kad egzistuoja gyvybės formos ir ne Žemėje, grindžiamas dviem teiginiais: kad kosmose yra panašių biocheminių junginių ir kad egzistuoja į Saulę panašios žvaigždės, apie kurias skrieja planetos

Nors gyvybė galbūt kadaise egzistavo Marse, primityvios gyvybės formos gal dar išlikusios šios planetos gelmėse, dauguma mokslininkų vis dėlto mano, kad Žemė yra vienintelė sistema Saulės sistemoje, kurioje yra gyvybė. Tačiau taip pat yra žinoma, kad Saulė – ne vienintelė žvaigždė, turinti planetinę sistemą. Visata labai didelė, taigi joje turėtų būti daug į Žemę panašių planetų, kuriose galėtų išsivystyti gyvybė.

Ne Žemėje atsiradusios gyvybės ir jos intelekto paieškose dalyvauja daug mokslininkų, tai veikia ir visuomenės vaizduotę. Negalima įrodyti, kad už Saulės sistemos ribų nėra gyvybės, tačiau ir priešingas teiginys vis dar nepatvirtintas.

23.1 lentelė. **Žemės parametrai**

Amžius	$4{,}6 \times 10^9$ metų
Dydis	
Forma	Suplotas rutulys
Ašigalinis skersmuo	6356,779 km
Pusiaujinis skersmuo	6378,164 km
Vidutinis spindulys	6371,03 km
Masė	$5{,}976 \times 10^{24}$ kg
Tūris	$1{,}0832 \times 10^{21}$ m^3
Vandenynai ir Žemės pluta	
Vandenyno masė	$1{,}45 \times 10^{21}$ kg
Vandenynais padengta paviršiaus dalis	70%
Vidutinis plutos storis: po vandenynais	8 km
Vidutinis plutos storis: po žemynais	~ 45 km (maždaug nuo 30 km iki 70 km)
Energija, temperatūra ir slėgis	
Saulės konstanta	1,353 kW · m^{-2}
Albedo	0,3
Vidutinė paviršiaus temperatūra	288 K
Normalus atmosferos slėgis	1013 milibarų = $1{,}013 \times 10^5$ Pa
Iš Saulės gaunama energija	$1{,}7 \times 10^{17}$ W
Gravitacija	
Laisvasis kritimo pagreitis (vidutinis)	9,80665 N · kg^{-1}
Laisvasis kritimo pagreitis (ties 45° platuma)	9,80612 N · kg^{-1}

1 ŽEMĖS AMŽIUS IR EVOLIUCIJA

Maždaug prieš 5 milijardus metų Paukščių Tako galaktikos vijoje, kurioje yra Saulė, sprogo masyvi žvaigždė, vadinama supernova. Sprogimas sukėlė smūginę bangą, kuri nusklido tarpžvaigždinėmis dujomis, užpildžiusiomis erdvę. Smūginės bangos kelyje dujos sutankėjo, ir vienas šio trikdžio rezultatų – prieš 4,6 milijardų metų susidariusi Saulės sistema. Plačiau jos atsiradimą nagrinėsime 27 skyriuje.

Šiuolaikinis mokslas teigia, kad Žemė ir kitos vidinės planetos susidarė **akrecijos** būdu. Šio proceso metu susidūrusios dalelės sulimpa ir

Elementų (%) pasiskirstymas	Plutoje	Mantijoje	Išoriniame branduolyje	Vidiniame branduolyje
Deguonis	46,4	~20		
Silicis	27,7	~10		
Aliuminis	8,1			
Geležis	5	~30	~90	100
Kalcis	3,6			
Natris	2,8			
Kalis	2,6			
Magnis	2,1	~30		
Nikelis			~10	
Kiti	<2	~10		

23.2 lentelė. **Žemės cheminių elementų pasiskirstymas**

taip pamažu išauga nemažas darinys (plačiau apie tai 27 skyriuje). Taip susidarė **proplanetės**. Didėjant proplanečių matmenims ir masei, stiprėjo ir jų gravitacija, todėl jos vis stipriau traukė viena kitą ir aplinkui esančius mažesnius darinius. Tarpusavio traukos veikiamiems dariniams įsibėgėjus, jų potencinė energija virsdavo kinetine. Susidūrimų metu ši kinetinė energija būdavo perduodama proplanečių paviršiuje esančioms molekulėms, todėl augančios planetos kaito. Vis dėlto ne darinių susidūrimai buvo svarbiausia planetų temperatūros kilimo priežastis. Susidarant planetoms vidiniuose sluoksniuose susikaupė ir ilgai gyvuojantys radionuklidai, tokie kaip uranas ar kalis. Radioaktyviojo skilimo metu išsiskiria nemažai energijos, todėl daugiausia dėl šio proceso Žemė pradinėje savo stadijoje smarkiai įkaito. Ilgiausiai gyvuojantys radionuklidai naudojami įvairiausių uolienų, tarp jų ir randamų Žemėje bei meteorituose, amžiui nustatyti. Šie matavimai patvirtina, kad Žemės amžius yra maždaug 4,6 milijardai metų.

23.3 lentelė. **Ilgai gyvuojantys radionuklidai Žemės plutoje**

Radionuklidas	Pusėjimo trukmė (10^9 metų)	Vidutinė koncentracija plutoje (gramų vienoje tonoje)	Šiluminė galia (10^{-7} W vienai uolienos tonai)
Uranas 238	4,9	2,2	}1,6 (bendra)
Uranas 235	0,7	0,02	
Kalis 40	1,3	0,24	0,7
Toris 232	14	8	1,6

■ Žr. 1 klausimą.

Kodėl Žemė sluoksninės sandaros

Akrecijos bei radioaktyviojo skilimo metu išsiskyrusi energija išlydė pirmapradę Žemę. Tankesni elementai – metalai, tokie kaip geležis ar nikelis – nugrimzdo į planetos centrą, o lengvesnės medžiagos – daugiausia įvairūs oksidai ir silikatai – išplaukė į paviršių. Kai Žemė atvėso, iš paviršiuje susikaupusių medžiagų susiformavo pluta, o vidinės susisluoksniavo (žr. 185 psl.).

Iš pradžių Žemės atmosferą tikriausiai sudarė pro paviršinį sluoksnį prasiskverbę vandens garai ir anglies dioksidas. Visos kitos lengvesnės dujos, tokios kaip vandenilis, neonas ar net metanas (CH_4), tikriausiai paliko Žemę, nes šias dujas sudarančių molekulių vidutiniai greičiai karštoje atmosferoje buvo didesni už atitrūkimo greitį, reikalingą Žemės traukai įveikti (žr. 1-os d. 66 ir 2-os d. 200 psl.).

Žemės amžiaus nustatymas

Radioaktyvieji elementai gali būti naudojami uolienų amžiui nustatyti, darant prielaidą, kad uolienų susidarymo metu radionuklidai buvo „gryni“, be antrinių skilimo produktų. Dėl šios priežasties tokiems tyrimams

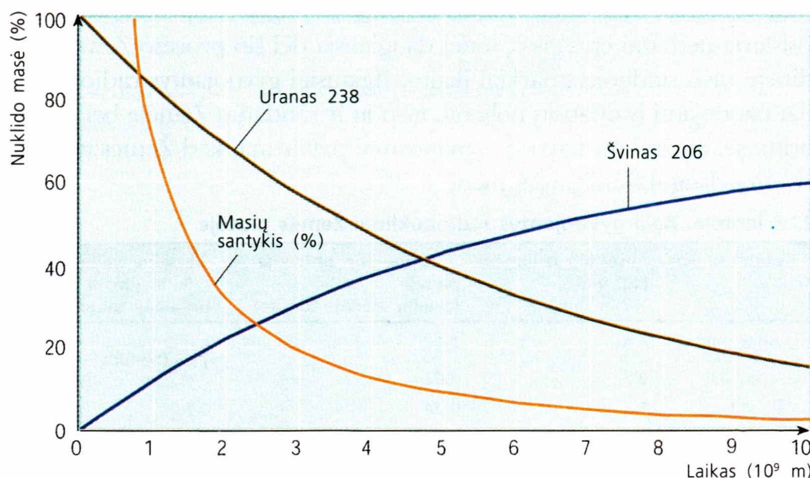
dažniausiai netinka iš nuosėdų susidariusios uolienos, nes nuosėdos paprastai susidaro dėl senesnių uolienų erozijos. Tuo tarpu vulkaninės kilmės uolienose radionuklidai yra „gryni", nes šios uolienos tikriausiai susidarė Žemei stingstant ankstyvojoje formavimosi stadijoje.

Geologiniams tyrimams naudojami tik ilgos pusėjimo trukmės radionuklidai. Urano–švino metodas geriausiai iliustruoja tokio pobūdžio matavimus.

Amžiaus nustatymas urano–švino metodu

Urano 238 pus4jimo trukmė yra $4{,}51 \times 10^9$ metų, jis skyla ir pavirsta toriu 234. Taip prasideda skilimo grandinė, kurios pabaigoje susidaro stabilus švino izotopas Pb 206 (23.1 pav.). Tačiau torio 234 ir jo antrinių produktų pusėjimo trukmė geologinėje skalėje yra palyginti neilga – „tik" keletas šimtų tūkstančių metų. Kadangi urano 238 pusėjimo trukmė tūkstančius kartų ilgesnė, tai visos urano–švino grandinės pusėjimo trukmę galime prilyginti $4{,}51 \times 10^9$ metų.

Tiriant šiuo metodu reikia labai kruopščiai išskirti cheminius elementus, nes jų koncentracijos yra labai mažos. Pavyzdžiui, 1 tonoje kalnų uolienos randama maždaug $2{,}0 \times 10^{-6}$ g urano 238 ir $3{,}4 \times 10^{-7}$ g švino 206.



23.1 pav. **Kai urano 238 kiekis dėl radioaktyvaus skilimo mažėja, švino 206 kiekis didėja. Ruda linija rodo, kaip šių elementų masių santykis ilgainiui kinta**

Jeigu pradiniu momentu yra N_0 radioaktyviųjų atomų, tai momentu t liks N nesuskilusių elementų:

$$N = N_0 e^{-\lambda t},$$

kur λ yra skilimo konstanta.

Ši išraiška gali būti perrašyta taip:

$$\frac{N_0}{N} = e^{\lambda t} \quad \text{arba} \quad \lambda t = \ln\frac{N_0}{N}$$

Gauname, kad
$$t = \frac{\ln(N_0 / N)}{\lambda} \qquad [1]$$

Skilimo konstantos vertę galima susieti su pusėjimo trukme, jei $N = 0{,}5\, N_0$ (t. y. $N_0 = 2N$), tai t yra pusėjimo trukmė T. Tokiu atveju gauname:

$$e^{\lambda t} = 2 \quad \text{arba} \quad \lambda T = \ln 2 \quad \text{ir} \quad \lambda = (\ln 2)/T = 0{,}693/T$$

Įrašę į [1] lygtį, gauname:
$$t = \frac{\ln(N_0 / N)}{0{,}693} T \qquad [2]$$

Apskaičiuokime, kokias mases atitinka vienodas branduolių skaičius. Pasinaudosime Avogadro skaičiumi: 1 molis arba $6{,}0 \times 10^{23}$ urano 238

branduolių sveria 238 gramus, o švino 206 sveria 206 g. Taigi urano atomų skaičius uolienoje yra

$$\frac{2,0 \times 10^{-6}}{238} \times 6,0 \times 10^{23} = 5,0 \times 10^{15}$$

Lygiai taip pat gauname, kad švino atomų skaičius yra lygus

$$\frac{3,4 \times 10^{-7}}{206} \times 6,0 \times 10^{23} = 9,9 \times 10^{14}$$

Švino atomai anksčiau buvo urano atomais, todėl pradinis urano atomų skaičius yra švino ir urano atomų suma:

$$N_0 = (5 + 0,99) \times 10^{15} = 5,99 \times 10^{15}$$

Tada randame santykį $N_0/N = 5,99/5,0 = 1,2$

Dabar, naudodamiesi [2] išraiška, galime apskaičiuoti uolienos amžių:

$$t = \frac{\ln 1,2}{0,693} \times 4,51 = 1,2 \text{ milijardo metų}$$

Gavome ne visai tokią vertę, kuri buvo nurodyta skyriaus pradžioje. Iš tikrųjų toks įvertinimo būdas netikslus. Visų pirma neatsižvelgėme į tai, kad pradiniu momentu uolienose tikriausiai būta ir švino. Be to, švinas galėjo pasišalinti iš uolienos cheminių junginių, pavyzdžiui, šarmų pavidalu. Taigi praktiškai problemą galime spręsti taip. Nedidelė dalis urano 238 skyla į uraną 235, susidaro kita radionuklidų grandinėlė, kuri baigiasi taip pat stabiliu švinu, tačiau šio izotopo masė 207. Tai reiškia, kad švino izotopų 206 ir 207 masių santykis yra vienodas, todėl juo remiantis galima patikslinti švino 206 masę tiriamoje uolienoje ir daug tiksliau nustatyti Žemės amžių.

?
A Įrodykite, kad prieš 4,6 milijardų metų vienoje tonoje Žemės plutos buvo 0,95 g kalio 40 (žr. 23.3 lentelę).

■ Žr. 2 klausimą.

2 ŽEMĖS TEMPERATŪRA IR ENERGIJOS BALANSAS

Temperatūra, tinkama gyvybei palaikyti

Gyvybė Žemėje priklauso nuo cheminių procesų, kurie nevyksta, kai temperatūra yra aukštesnė kaip 35 °C (308 K). Žemiau 0 °C (273 K) biocheminės reakcijos vyksta labai lėtai. Be to, šioje temperatūroje užšąla grynas vanduo. Kadangi daugelyje procesų vanduo dalyvauja kaip reagentas ir kaip tirpiklis, tai tokios reakcijos negali vykti žemiau šios temperatūros. Dėl to galima teigti, kad gyvybė gali egzistuoti tik nedideliame temperatūrų intervale nuo 0 °C iki 35 °C.

Nuo ko priklauso Žemės paviršiaus temperatūra?

Saulės sistemos planetų paviršiaus temperatūrą sąlygoja šie veiksniai:

- Iš Saulės gaunama šiluminė spinduliavimo energija.
- Planetų viduje išsiskyrusi energija (dėl elementų radioaktyvumo).
- Planetų į atvirąjį kosmosą išspinduliuojama energija.

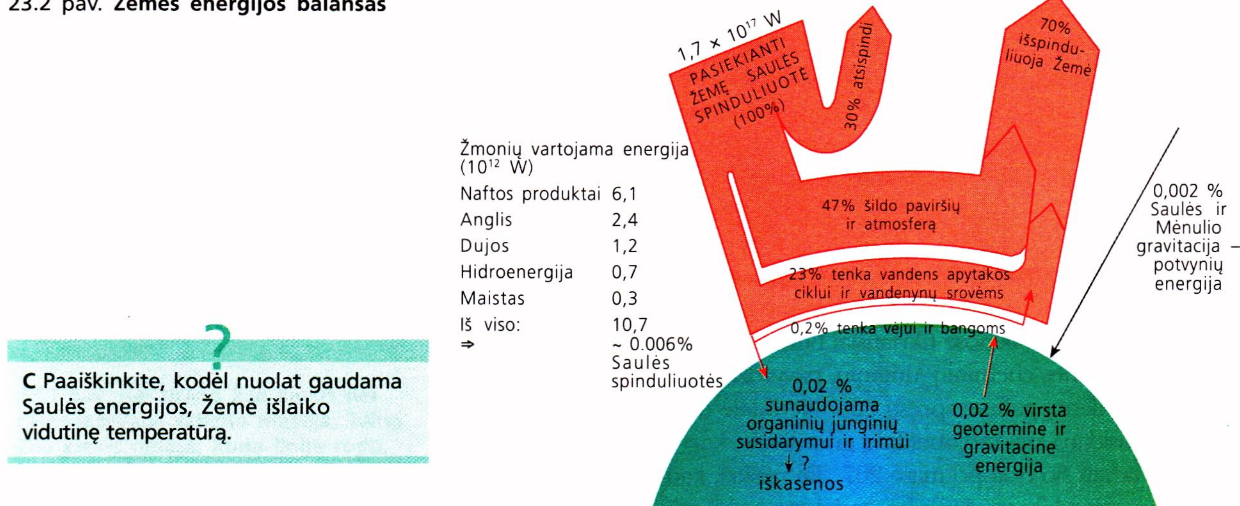
?
B Nurodykite dvi priežastis, dėl kurių Žemės vidiniai sluoksniai yra karštesni negu jos paviršius.

Saulės energija

Didžioji dalis Saulės išspinduliuotos energijos yra regimojoje elektromagnetinio spektro srityje, o visa Saulės spinduliuotės galia yra $3,8 \times 10^{26}$ W. Tik labai nedidelę šios energijos dalį – $1,353 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ sugeria Žemė. Ši energija vadinama **Saulės konstanta** S. Tačiau Žemė sugeria ne tiek jau daug: apie 30% regimosios spinduliuotės atspindi debesys, ledas, vandenynai ir sausuma. Atspindėtos energijos santykis su kritusia vadinamas **albedo** ir dažniausiai žymimas raide a: Žemės $a = 0,30$.

Žemę pasiekusi energija šildo sausumą, vandenynus ir atmosferą, išgarina vandenį ir priverčia jį cirkuliuoti vandens apytakos ciklu. Atmosfera yra gana skaidri, todėl tiesioginiai Saulės spinduliai ją silpnai šildo. Ji daugiau įkaista nuo sušilusio planetos paviršiaus. Gautoji energija įšilusioje cirkuliuojančioje atmosferoje pasiskirsto maždaug tolygiai apie Žemę: tropinėje srityje smarkiai įkaitusi atmosfera konvekciniais srautais juda link polių. Konvekcinės vandenynų srovės taip pat padeda perskirstyti energiją po visą Žemės rutulį. Pavyzdžiui, Golfo (*Gulf*) srovė neša šiltą vandenį nuo Karibų iki Vakarų Europos.

23.2 pav. **Žemės energijos balansas**

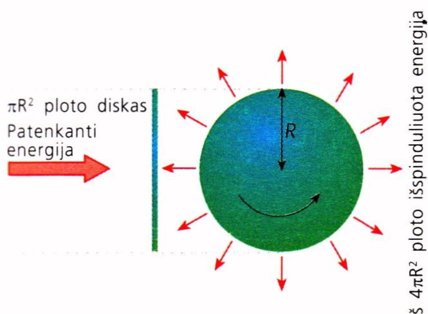


C Paaiškinkite, kodėl nuolat gaudama Saulės energijos, Žemė išlaiko vidutinę temperatūrą.

23.2 paveiksle pavaizduota, kas atsitinka Žemėje su sugerta energija. Šilta Žemė taip pat spinduliuoja energiją į aplinką. Vidutinė Žemės paviršiaus temperatūra nusistovi tokia, kad išspinduliuota energija būtų lygi sugertai energijai:

$$P_{sug} = P_{spind}$$

Galima įvertinti atmosferos įtaką Žemės paviršiaus temperatūrai tariant, kad „plika“ (be atmosferos) Žemė (23.3 pav.) elgiasi kaip „juodasis kūnas“ (apie tai 1-os d. 305 p.).



23.3 pav. **Žemės energijos mainai**

Per sekundę sugeriama energija (vatais):

Saulės konstanta S × (1 – albedo, a) × Žemės disko plotas

Taigi sugertoji galia

$$P_{sug} = 1{,}353 \times 10^3 \times (1 - 0{,}3) \times \pi R^2 = 947 \pi R^2,$$

kur R yra vidutinis Žemės spindulys.

Žemės išspinduliuojamą energiją P_{spind} galima apskaičiuoti pritaikius Stefano ir Bolcmano dėsnį:

Energija, kurią išspinduliuoja juodo kūno vieno kvadratinio metro paviršiaus plotas, yra tiesiog proporcinga kūno temperatūros T ketvirtajam laipsniui: σT^4

σ vadinama **Stefano-Bolcmano konstanta** ir yra lygi

$$5{,}57 \times 10^{-8}\ \mathrm{W \cdot m^{-2} \cdot T^{-4}}.$$

Visa Žemės spinduliuojama energija lygi $= A\sigma T^4$,

kur A yra planetos paviršiaus plotas, t. y. R spindulio *sfera*. Tada spinduliuojamoji galia

$$P_{spind} = 4\pi R^2 \times 5{,}67 \times 10^{-8} \times T^4$$

Iš sugertos ir išspinduliuotos energijos lygybės gauname:

$$4 \times 5{,}67 \times 10^{-8} \times T^4 = 947$$

Iš čia gauname Žemės paviršiaus temperatūrą:

$$T = 254\ \mathrm{K},\ \text{arba}\ -19\ ^\circ\mathrm{C}$$

D Patikrinkite apskaičiuotą vidutinę „plikos“ Žemės paviršiaus temperatūros vertę –19 °C.

Tačiau Žemę dengia atmosfera, todėl tikroji jos paviršiaus temperatūra yra 288 K, arba +15 °C. Nedidelę šių papildomų 34 laipsnių dalį sąlygoja energijos srautas iš Žemės vidaus, *tačiau visas likęs temperatūros prieaugis yra atmosferos padarinys.*

Žr. 3 klausimą.

3 ATMOSFERA – DUJINĖ PLANETOS SKRAISTĖ

Atmosferoje esančių molekulių energija gali būti trijų pavidalų:

- **Slenkamojo judėjimo kinetinė energija** susidaro molekulėms judant erdvėje.
- Molekulės gali suktis, todėl jos turi **sukamojo judėjimo kinetinės energijos**.
- Atomai molekulėje gali virpėti vienas kito atžvilgiu apie savo pusiausvyros padėtis. Ši molekulių energija vadinama **virpesių energija**. Virpėjimo metu atomai turi tai kinetinės, tai potencinės energijos.

Prisiminkite: $\frac{1}{2}m\overline{c^2} = \frac{3kT}{2}$

Žr. 1-os d. 160 p.

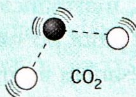
Galima apytiksliai tarti, kad dujų temperatūra yra proporcinga vidutinei dujas sudarančių molekulių slenkamojo judėjimo energijai. Tuo tarpu atmosferos sluoksnio šilumines savybes nulemia molekulių virpesių energija. Molekulės virpesių energija gali padidėti tik tuo atveju, jeigu ji sugeria kvantą, kurio energija lygi atstumui tarp dviejų energijos lygmenų (23.4 pav.).

Anglies dioksido molekulės virpesių sužadinimo energija yra artima Žemės spinduliuojamų šiluminių kvantų intensyvumo maksimumui ties 2×10^{13} Hz dažniu infraudonųjų spindulių diapazone (λ = 15 μm). Kitos dujos gali sugerti beveik tokios pačios energijos šiluminius spindulius: ozono (O_3) molekulės virpesiams sužadinti reikia fotonų, kurių dažnis 3×10^{13} Hz (λ = 10 μm), o vandens molekulei sužadinti – $(4 – 5) \times 10^{13}$ Hz ($\lambda \sim 5$ μm) dažnio fotonų.

Ozonas susidaro iš atmosferos deguonies (O_2): pirmiausia deguonies molekules suardo ultravioletiniai Saulės spinduliai, o po to deguonies atomai rekombinuoja į ozono molekules (O_3). Ozono atmosferoje yra nedaug, todėl jis nesukelia tokio stipraus šiluminio efekto kaip anglies dioksidas. Tačiau plonas ozono sluoksnis absorbuoja ultravioletinius spindulius ir sulaiko Saulės skleidžiamą jonizuojančiąją spinduliuotę.

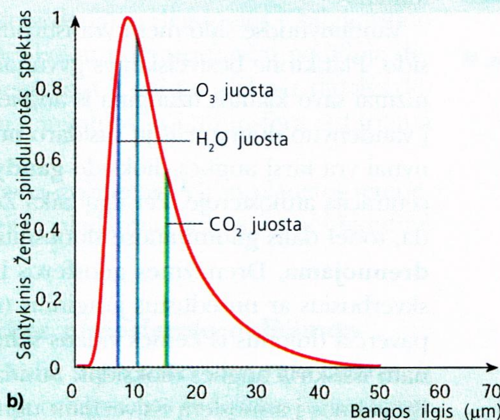
23.4 pav. Anglies dioksidas yra veiksmingos šiltnamio dujos

Infraraudonojo diapazono fotonas: energija $E_p = hf$

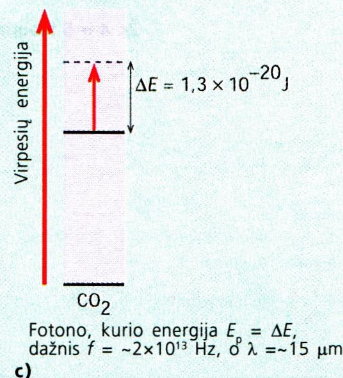


CO_2 molekulė virpa dažniais, atitinkančiais kvantuotas energijas

a)



b)



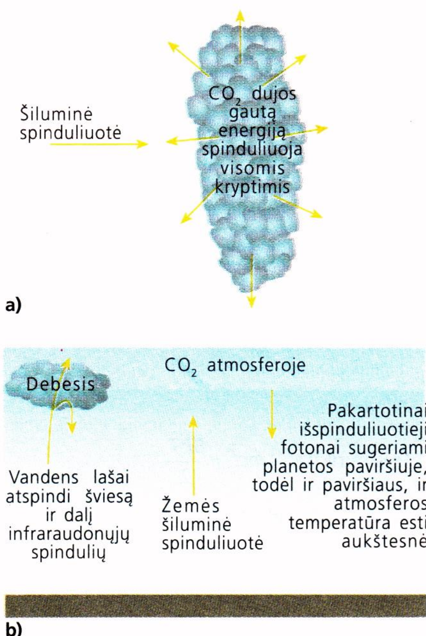
Fotono, kurio energija $E_p = \Delta E$, dažnis $f = \sim 2 \times 10^{13}$ Hz, o $\lambda = \sim 15$ μm

c)

Šiltnamio efektas

Anglies dioksido molekulės sugerta energija beveik akimirksniu vėl išspinduliuojama infraudonojo diapazono fotono pavidalu. Išspinduliuotų fotonų sklidimo kryptis gali būti bet kokia. Dėl to maždaug pusė visų anglies dioksido išspinduliuotų fotonų sugrįžta *atgal į Žemę.*

Prisiminkite, kad į Žemę krintančių Saulės spindulių energijos maksimumas yra regimojoje elektromagnetinio spektro srityje. Šioje srityje atmosfera kaip tik yra skaidriausia. Kadangi atmosferos dujų *sugerties* energija yra Žemės spinduliuojamų elektromagnetinių bangų srityje, tai

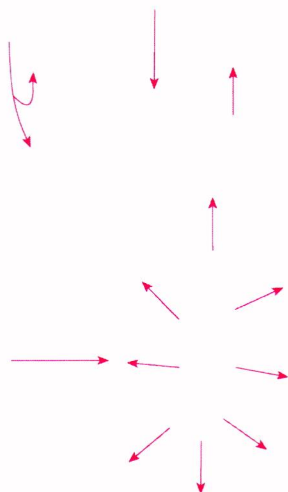


23.5 pav. **Atmosferos sluoksnis sulaiko šilumą. Anglies dioksido koncentracija yra daug didesnė nei kitų dujų, kurių absorcijos juosta yra toje pačioje spektro srityje**

?

E Pakartokite skaičiavimus ir patikrinkite, ar gautoji vidutinė Žemės paviršiaus temperatūra 16 °C yra teisinga.

Žr. 4 ir 5 klausimus. ■



atmosfera veikia kaip šilumą sulaikanti antklodė. Panašiai šiltnamiuose yra palaikoma didesnė temperatūra negu išorėje: saulės šviesa ir trumpieji infraraudonieji spinduliai praeina pro stiklą, tačiau ilgesnių bangos ilgių infraraudonieji spinduliai, kuriuos spinduliuoja šiltnamyje esantys augalai ar dirvožemis, sugeriami šiltnamio viduje. Dėl to energijos sugertis atmosferoje yra vadinama **šiltnamio efektu** (žr. 23.5 pav.).

Taip dėl sugerties atmosferoje tik 60% šiluminės Žemės spinduliuotės pasiekia kosminę erdvę. Ši atmosferos savybė apibūdinama **skaidrumo koeficientu**, kuris Žemei lygus $b = 0{,}6$. Energijos balansas (vatais) dabar gali būti perskaičiuotas taip:

$$\text{sugertoji galia} = \text{išspinduliuotoji galia}$$

Pagal 180 puslapyje pateiktus skaičiavimus gauname:

$$\text{sugertoji galia} = S\,(1 - a)\,\pi R^2 = 947\,\pi R^2$$

$$\text{išspinduliuotoji galia} = b \times 4\pi R^2 \times \sigma T^4$$

Sulyginę šias dvi išraiškas gauname:

$$T = 289 \text{ K arba } 16\ ^\circ\text{C}.$$

Tokiu paprastu modeliu gauta vidutinė Žemės paviršiaus temperatūra yra labai artima išmatuotai temperatūrai, kuri lygi 288 K, arba 15 °C.

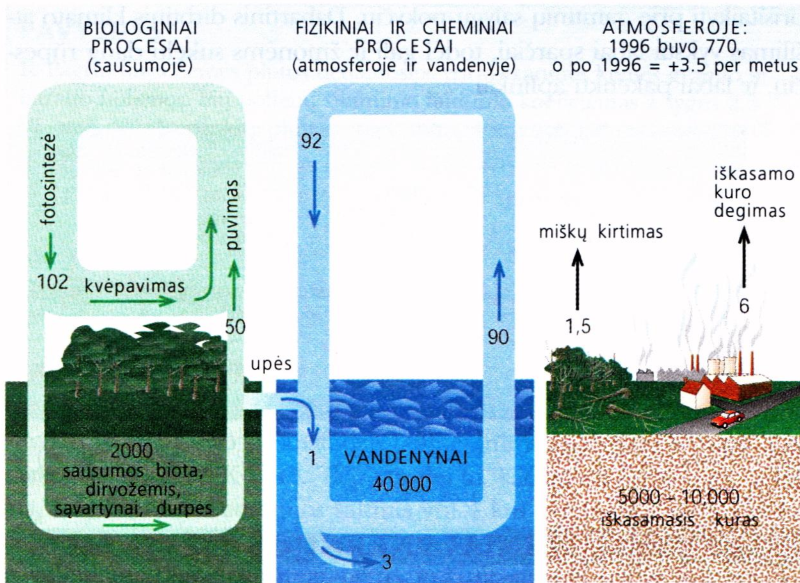
Anglies dioksido cirkuliacija, arba dar apie šiltnamio efektą

Anglies dioksidas sudaro vos 0,03% visų atmosferos dujų. Prieš 4 milijardus metų anglies dioksidas tikriausiai sudarė 98% visų atmosferos dujų, panašiai kaip dabar Veneros atmosferos. Po to Žemė atvėso tiek, kad galėjo kondensuotis vanduo. Anglies dioksidas tirpus vandenyje, todėl lietūs didesnę dalį šių dujų išplovė iš atmosferos. Tada vykstant cheminiams procesams anglies dioksidas perėjo į karbonatus, kurie dabar slūgso įvairiose uolienose, tokiose kaip kreida, kalkakmeniai ir dolomitai.

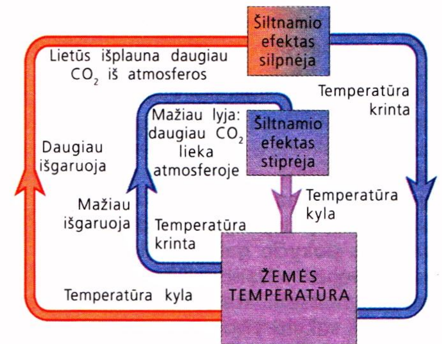
Vandenynuose šiuo metu yra ištirpusi labai didelė masė anglies dioksido. Planktone besiveisiantys gyvūnai, įvairūs jūrose gyvenantys organizmai savo kiautus užaugina iš anglies dioksido. Šie kiautai nugrimzta į vandenyno dugną ir iš jų susidaro nuosėdinės uolienos. Dėl to vandenynai yra tarsi anglies dioksido **gaudyklės**, mažinančios šių dujų koncentraciją atmosferoje. Per ilgą laiką Žemės pluta po vandenynais nusėda, todėl dalis giluminiuose sluoksniuose esančių anglies junginių **nudrenuojama**. Drenažinės geosferos hipotezė teigia, kad gilyn prasiskverbusius ar nusėdusius junginius (ne tik hidrokarbonatus) išlydo ir paverčia dujomis iš Žemės vidaus sklindanti šiluma. Iš įkaitusių karbonatų išsiskiria anglies dioksidas. Susidariusios dujos ima kilti aukštyn ir išmetamos į atmosferą išsiveržiant ugnikalniams.

Apibendrinant galima pasakyti, kad anglies dioksido randama tokiose vietose: 1) ištirpusio vandenyje, 2) surišto kietuosiuose junginiuose Žemės paviršiuje ir 3) labai dideli jo kiekiai yra sukaupti giluminėse Žemės plutos uolienose.

Geologiniuose sluoksniuose anglies dioksido perdirbimas vyksta labai lėtai. Daug spartesnė jo apytaka sudaroma organizmų grandine. Augalai pasisavina anglies dioksidą iš atmosferos, suvartoja jį ir grąžina į atmosferą deguonį. Deguonis reikalingas daugelio organizmų kvėpavimui – jam vykstant deguonis susijungia su anglimi ir susidaręs anglies dioksidas iškvepiamas į atmosferą.



23.6a) pav. **Anglies dioksido sankaupos Žemėje ir jo srautai. Paveiksle nurodyti skaičiai yra anglies masė, išreikšta 10^9 tonų vienetais**



23.6b) pav. **Grįžtamasis ryšys tarp Žemės temperatūros ir anglies dioksido. Schema sudaryta tarus, kad bendras CO_2 kiekis sistemoje nekinta**

Negyvi augalai ir gyvūnai taip pat gali būti tam tikra anglies saugykla. Taip atsitinka tuo atveju, jei jie dėl kokių nors priežasčių (pvz., užkasami) netenka sąlyčio su deguonimi ir nespėja oksiduotis. Taip atsitiko Žemėje jau ne vieną kartą, todėl daug anglies susikaupė **hidrokarbonatų** junginiuose – tokiuose kaip akmens anglis, dujos ir nafta.

Anglies dioksido pusiausvyra

Apie 30% anglies dioksido nuolatos cirkuliuoja atmosferoje vykstant įvairiems procesams. Per ilgą Žemės gyvavimo laiką nusistovėjo pusiausvyra tarp deguonies ir anglies dioksido koncentracijų, galima sakyti, kad susidarė savireguliacijos sistema su stipriu grįžtamuoju ryšiu.

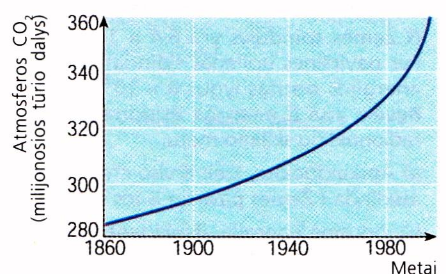
Šis grįžtamasis ryšys veikia taip. Tarkime, susidaro anglies dioksido perteklius. Jis spartina augalų augimą, taigi šie pasisavina daugiau anglies dioksido ir grąžina į atmosferą daugiau deguonies – taigi atstato pusiausvyrą. Jeigu atmosferoje dėl kokių nors priežasčių padidėja deguonies koncentracija, tai vangi vegetacija ir gaisrai (dėl per didelės deguonies koncentracijos) sumažina augalijos, o į atmosferą išskiriama daugiau anglies dioksido.

Anglies dioksidas sudaro dar vieną grįžtamąjį ryšį su planetos temperatūra (23.6b) pav.). Šio ryšio dėka palaikoma pastovi Žemės vidutinė temperatūra.

Anglies dioksido koncentracijos atmosferoje didėjimas

Šiuo metu vis daugiau rūpesčių kelia stiprėjantis šiltnamio efektas. Jį sukėlė pastovus anglies dioksido koncentracijos didėjimas atmosferoje per paskutinį šimtmetį (23.7 pav.). Tai daugiausia nulėmė žmonių veikla – vis daugiau sudeginama anglies ir vis didinamas gyvulių skaičius žemės ūkyje. Dėl to padidėjo į atmosferą išmetamo anglies dioksido kiekis. Be to, gyvulių fermose susidaro palyginti nemažai metano, kuris yra dar efektyvesnės šiltnamio dujos.

Anglies dioksido koncentracijos padidėjimas sukėlė **pasaulinį atšilimą**. Žemės praeityje jau yra buvę ir pasaulinių atšilimų, ir atšalimų. Šilto klimato ir šalto klimato (ledynmečių) laikotarpiai tęsėsi nuo kelių tūkstančių iki kelių dešimčių tūkstančių metų (23.8 pav.). Spėjama, kad klimato kitimas vykdavo palyginti lėtai, todėl gyvoji gamta suspėdavo

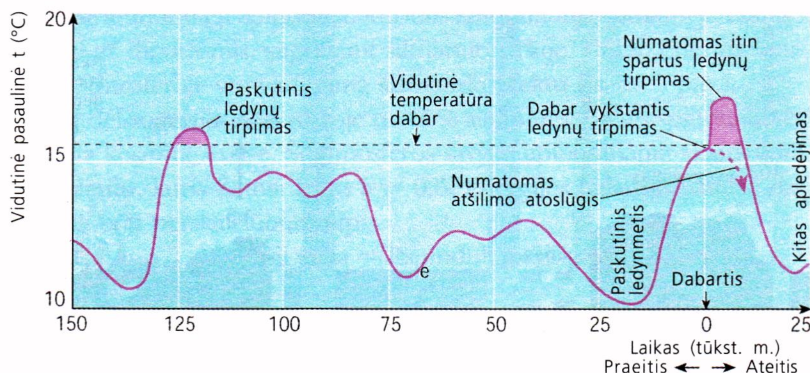


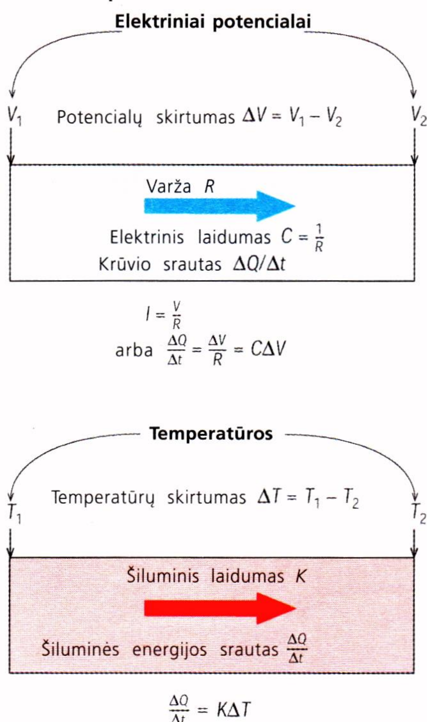
23.7 pav. **Anglies dioksido koncentracija per paskutinius du šimtus metų nepaliaujamai didėja**

23.8 pav. **Planetos temperatūros pokyčiai per paskutinius 150 000 metų ir jos prognozė artimiausiems 25 000 metų.**

Apledėjimų priežastys vis dar nėra tiksliai žinomos. Manoma, kad juos galėjo sukelti padidėjęs ugnikalnių aktyvumas: išsiveržiant ugnikalniams į atmosferą išmetamas ne tik didelis kiekis anglies dioksido, bet ir daug dulkių, kurios trukdo Saulės spinduliuotei prasiskverbti iki planetos paviršiaus. Be to, ir pačios Saulės aktyvumas gali ilgainiui kisti. Dar viena priežastis, kuri galėjo sąlygoti pasaulio klimato pokyčius, yra Žemės sukimosi ašies pasvirimo jos orbitos plokštumos atžvilgiu kitimas. Reikia atsižvelgti ir į kontinentų judėjimą: dėl nedidelio jų padėties pokyčio gali pasislinkti nusistovėjusios vandens ir oro srovės vandenynuose ir atmosferoje, o tai savo ruožtu – sukelti visuotinio atšilimo ar atšalimo procesus

prisitaikyti prie gamtinių sąlygų pokyčių. Dabartinis dirbtinis klimato atšilimas vyksta labai sparčiai, todėl gali ir žmonėms sukelti daug rūpesčių, ir labai pakenkti aplinkai.





23.9 pav. **Analogija tarp elektros srovės ir šilumos srauto**

?

F Patikrinkite, ar šiluminio laidumo vienetai [1] ir [2] sąryšiuose yra teisingi.

G Žemės spindulys yra $6,4 \times 10^6$ m. Per paviršines uolienas sklindantis energijos srautas lygus 8×10^{-2} W·m^{-2}. Beveik visa ši energija išsiskiria radionuklidų skilimo metu.

a) Apskaičiuokite, kiek iš viso energijos atsklinda į Žemės paviršių iš jos gelmių.

b) Vidutinė energija, išsiskirianti per vieną sekundę Žemės drebėjimų metu, yra 10^{11} W. Apskaičiuokite procentais, kokią dalį ši energija sudaro Žemės gelmėse išsiskiriančios šilumos.

4 ŽEMĖS VIDINIAI ENERGIJOS ŠALTINIAI

Radioaktyvieji elementai dėl savo cheminių savybių jau ankstyvojoje Žemės planetos susidarymo stadijoje oksidavosi – sudarė palyginti nedidelio tankio junginius ir iškilo į paviršinius išsilydžiusios Žemės sluoksnius. Dėl to radioaktyvieji elementai susikaupė Žemės plutoje. Tačiau plutos tūris palyginti su vidiniais Žemės sluoksniais yra nedidelis, todėl mantijoje skylant radioaktyviesiems elementams vis tiek išsiskiria daug daugiau šilumos negu plutoje (žr. 23.4 pav.).

Radioaktyviojo skilimo energijos srautas yra maždaug 80 mW · m^{-2}. Tik penktadalis šios energijos sklinda iš plutos, o visa kita energijos dalis atsklinda iš gilesnių Žemės sluoksnių. Ši energija yra maždaug 10 kartų didesnė už dirbtinių šaltinių generuojamą energiją, tačiau apie 4000 kartų mažesnė už energijos kiekį, kurį Žemė gauna iš Saulės.

Šiluminis laidumas ir konvekcija

Energija, išsiskyrusi branduolyje ir mantijoje, perduodama į planetos paviršių abiem būdais: ir šiluminiu, ir konvekcija. Kietojoje litosferoje (plutoje ir viršutinėje mantijoje) laidumas yra pagrindinis energijos perdavimo mechanizmas. Tektoninių plokščių poslinkiai ir su jais susijęs vulkanų aktyvumas yra vienas iš veiksmingiausių būdų, kuriais įkaitę vidiniai planetos sluoksniai gali perduoti energiją į planetos paviršių.

Šiluminio laidumo dėka kietuoju kūnu perduodamos energijos srautas gali būti išreikštas „šilumos perdavimo formule“:

$$\text{energijos srautas} = \frac{\text{temperatūrų skirtumas}}{\text{šiluminė varža}}$$

Ši formulė analogiška Omo dėsniui, pritaikytam krūvių judėjimui (žr. 23.9 pav.), tačiau šilumos perdavimo reiškinį patogiau aprašyti **šiluminiu laidumu** *K*, o ne varža. Tada galime šilumos srautą išreikšti šitaip:

energijos srautas = temperatūrų skirtumas × šiluminis laidumas [1]

Panašiai kaip ir elektros srovės atveju, šiluminį tam tikro ilgio ir storio terpės laidumą apibrėžiame taip:

$$\text{šiluminio laidumo koeficientas} \times \frac{\text{skerspjūvio plotas}}{\text{ilgis}} \qquad [2]$$

Šiluminio laidumo koeficiento λ reikšmė priklauso nuo medžiagos savybių, o jo vienetas yra W · m^{-1} · K^{-1}.

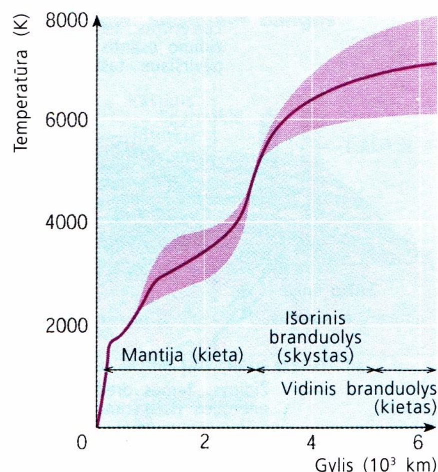
PAVYZDYS

K Pagrindinės Žemės plutos dedamosios yra vulkaninės kilmės granito ir bazalto uolienos. Šių uolienų šiluminio laidumo koeficientas λ lygus 2,5 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$. Įvertinkite plutos temperatūrą 4 km gylyje.

A Šiluminės energijos srautas lygus 8×10^{-2} $W \cdot m^{-2} = \Delta T \times \lambda A/L$, kur $A = 1$ m^2 ir $L = 4$ km. Išreiškę ΔT gauname:

$$\Delta T = \frac{8 \times 10^{-2} \times 4 \times 10^{3}}{2,5} = 128 \text{ K}$$

Gavome 128 K temperatūrų skirtumą. Tai reiškia, kad temperatūra 4 km gylio gręžinyje turėtų būti apie ~12 °C + 128 °C = 140 °C.



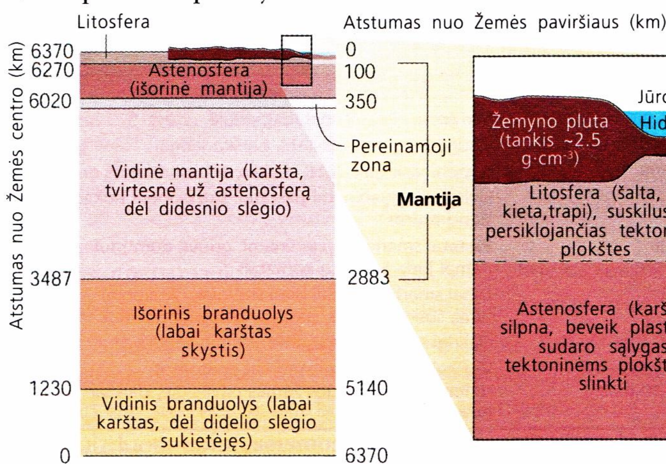
23.10 pav. **Teoriškai įvertintos galimos vidinių Žemės sluoksnių temperatūros geotermės. Nuspalvintos sritys žymi galimų temperatūrų intervalus**

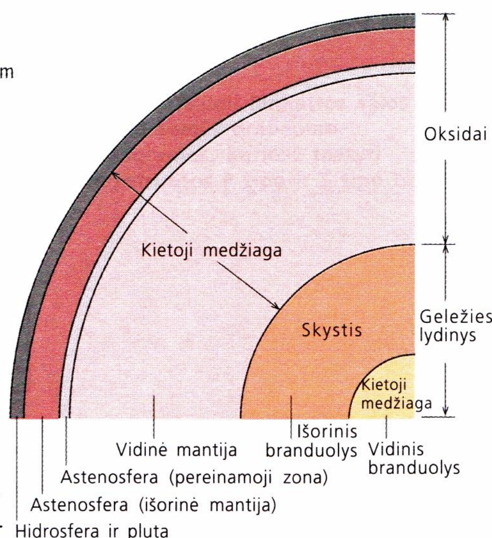
Pavyzdžio paaiškinimai

Gautasis rezultatas reiškia, kad temperatūros gradientas Žemės paviršiuje yra 3×10^{-2} $K \cdot m^{-1}$. Išmatuotas temperatūros gradientas yra šiek tiek mažesnis: 2×10^{-2} $K \cdot m^{-1}$. Taip yra dėl to, kad mūsų uždavinyje tariama, kad šiluminės energijos šaltinis yra 4 km gylyje. Iš tikrųjų radionuklidai, kurių išskirtą energiją ir norime įvertinti, pasiskirstę *visame* paviršiniame planetos tūryje, be to, jų koncentracija paviršiuje yra didesnė negu giliau esančiose uolienose.

5 VIDINĖ ŽEMĖS SANDARA

Jau anksčiau aptarėme, kad pirminėje Žemės susidarymo stadijoje temperatūra pakilo tiek, kad medžiaga planetos gelmėse išsilydė. Tada prasidėjo vadinamasis planetos **skaidymosi** procesas: sunkesnieji elementai (kaip antai geležis ir nikelis) grimzdo gilyn, sudarydami branduolį, lengvesnieji elementai bei jų junginiai sustingo plutoje ir mantijoje. 23.11 paveiksle parodyti svarbiausi sluoksniai.

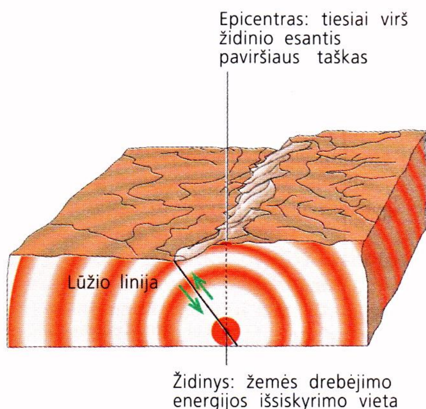




23.11 pav. **Vidinė Žemės sandara**

Dabartinėmis technikos priemonėmis neįmanoma pasiekti gylio, kuriame būtų galima tirti plutoje vykstančius procesus. Paprastai gręžiami labai gilūs gręžiniai sausumoje iki 10–15 km, kad būtų galima pasiekti niekur Žemės paviršiuje nerastą bazaltinį sluoksnį, o vandenyje 10–12 km gylio nuo vandens paviršiaus, kad būtų galima pasiekti viršutinius mantijos sluoksnius. Tačiau išsiaiškinti procesus, vykstančius visoje viršutinės mantijos storymėje, tegalima tik netiesioginiais metodais.

Svarbiausias netiesioginis metodas – seisminis. Naudojantis šiuo metodu, galima pagal bangų, atsirandančių dėl žemės drebėjimų ar dirbtinių sprogimų, sklidimo greitį spręsti apie vienokiame ar kitokiame gylyje slūgsiančios medžiagos tamprumą. Mokslas, tyrinėjantis šias bangas, vadinamas **seismologija**.



23.12 pav. **Žemės drebėjimo židinys yra taškas, kuriame išsiskiria energija – ten, kur įvyksta pirmasis krustelėjimas tektoninio lūžio linijoje. Epicentras yra planetos paviršiaus taškas, esantis tiesiai virš židinio**

Žemės drebėjimai ir seismologija

Žemės drebėjimas vyksta tuomet, kai vienas didelis uolienų tūris pasislenka kitų uolienų atžvilgiu. Žemės paviršius tose vietose raukšlėjasi. Raukšlinėje zonoje susidaro platforma. Kaip tik ten pluta yra silpniausia ir gali neatlaikyti milžiniško gelmių spaudimo. Galimų žemės drebėjimų epicentrai išsidėstę išilgai raukšlių (23.12 pav.), kurios vadinamos **tektoninių lūžių linijomis**.

Dėl litosferos plokščių judėjimo ir mažesnių jos blokų spaudimo susidaro įtempimai. Jie kaupiasi iš lėto, palaipsniui, o išsikrauna staiga, sukeldami žemės drebėjimus. Šio proceso metu išlaisvinama tampriųjų įtempimų energija, kuri akimirksniu pasklinda deformacinių bangų pavidalu. Šios bangos gali sklisti tik tomis Žemės plutos sritimis, kurios yra pakankamai *tamprios*, o ne *plastinės* (pakankamai šaltos). Plastinės (minkštos) medžiagos sugertos energijos neperduoda, o suvartoja ją negrįžtamai deformacijai.

Richterio skalė

Gana stiprus žemės drebėjimas, galintis pastebimai sukrėsti namus ir sukelti nedidelius sugriovimus, pagal Richterio skalę žymimas 5 balais (23.4 lentelė). Tokio drebėjimo metu išsiskiria maždaug 6×10^{10} J energija. Žemės drebėjimas sukelia tuo daugiau sugriovimų, kuo arčiau planetos paviršiaus jis įvyksta. Sugriovimai įvyksta dėl to, kad paviršiaus taškai juda su pagreičiu išilgai bangos sklidimo krypties. Dėl to pastatai tiesiog nesuspėja pasislinkti kartu su juos laikančių pamatų svyravimais.

Žemės drebėjimų metu išsiskyrusi energija pernešama **seisminėmis bangomis**. 5 balų pagal Richterio skalę žemės drebėjimas sukelia *seką* virpesių, kurių metu didžiausias pasiekiamas pagreitis yra 5 $m{\cdot}s^{-2}$ (0,5 *g*).

Didžiausių 8,6 balų pagal Richterio skalę žemės drebėjimų metu išsiskiria iki 10^{18} J energijos, o jų sukeltas maksimalus pagreitis siekia 10g. Per 100 metų vidutiniškai įvyksta maždaug 10 tokio stiprumo žemės drebėjimų.

23.4 lentelė. **Žemės drebėjimų stiprumas pagal Richterio skalę**

Richterio skalė	Žemės drebėjimų skaičius per metus	Būdingi požymiai
<3,4	800 000	Užregistruojami tik seismometrais
3,5–4,2	30 000	Vos vos pastebimi patalpų viduje
4,3–4,8	4800	Daugelis žmonių pastebi, barška langai
4,9–5,4	1400	Pastebi visi: gali dūžti lėkštės, trinksi atlapos durys
5,5–6,1	500	Šiek tiek apgadinami pastatai: sutrūkinėja tinkas, sienų mūras
6,2–6,9	100	Pastatai smarkiai apgadinami: griūva dūmtraukiai, namai juda kartu su pamatais
7,0–7,3	15	Labai smarkiai sugadinami statiniai: iškraipomi tiltai, suskyla sienos, pastatai gali sugriūti
7,4–7,9	4	Galingi smūgiai, dauguma statinių sugriūva
>8,0	Vienas kas 5–10 metų	Visiškai sugriaunami statiniai, matomos deformacinės bangos žemės paviršiuje, daiktai išmetami į orą

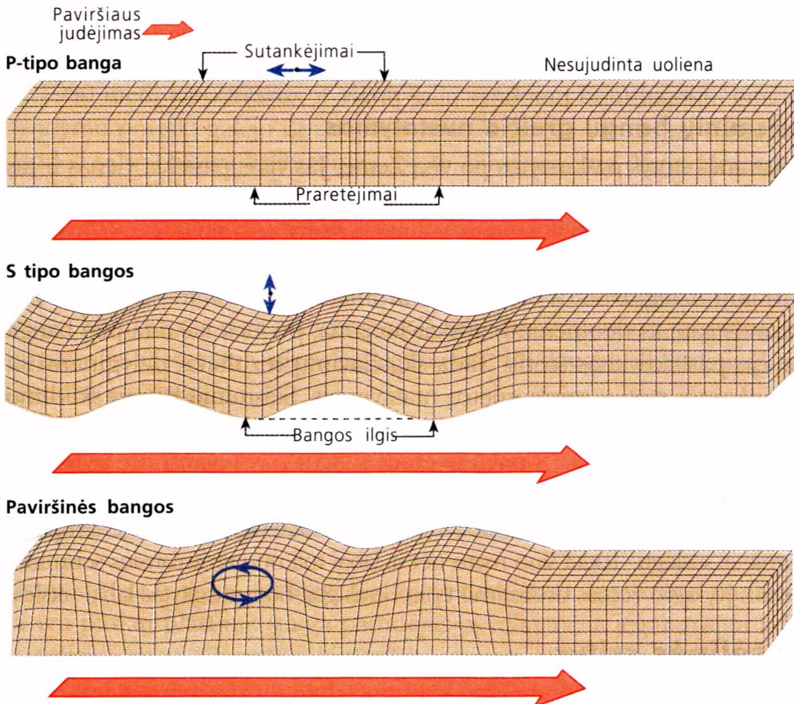
Richterio skalę apibrėžianti funkcija yra logaritminė ir gana sudėtinga. Pagal ją žemės drebėjimo įvertinimas balais proporcingas stipriausios seisminės bangos amplitudės logaritmui. Vienetinis Richterio skalės balo padidėjimas atitinka 30 kartų didesnę energiją, išsiskyrusią per žemės drebėjimą. Pavyzdžiui, per 8 balų žemės drebėjimą išsiskiria $30 \times 30 \times 30 = 27\,000$ kartų daugiau energijos negu per 5 balų žemės drebėjimą.

Seisminės bangos

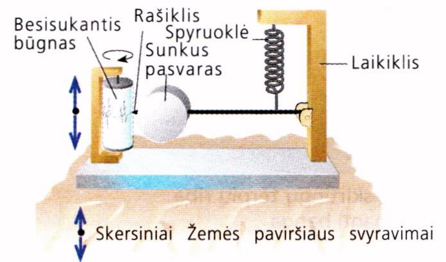
Nuo žemės drebėjimo vietos – **židinio** – energija pernešama bangų seka. Artimiausias židiniui planetos paviršiaus taškas yra tiesiai virš jo. Šis taškas vadinamas **epicentru** (23.12 pav.). Žemės drebėjimų bangas galima suskirstyti į tris tipus; jų savybės nurodytos 23.5 lentelėje ir 23.13 paveiksle. Seisminės bangos detektuojamos **seismometrais**.

23.5 lentelė. **Seisminės bangos**

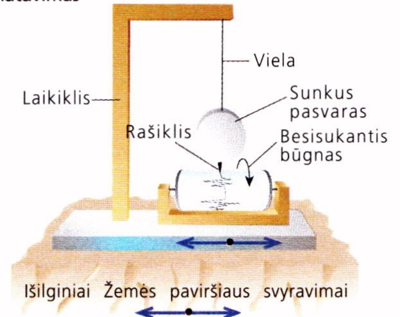
Banga	Aprašymas	Greitis pačiame viršutiniame plutos sluoksnyje
P tipo banga	Pirminė banga (kinta slėgis: vyksta postūmiai) yra tamprioji banga, kuri sklinda uoliena kaip *išilginė* suspaudimo banga	6 km · s^{-1}
S tipo banga	Antrinė banga (smūginė) yra tamprioji banga, kuri sklinda uoliena kaip *skersinė* banga	3,5 km · s^{-1}
Paviršinė banga (L)	Paviršinės bangos yra skersinės bangos, priverčiančios paviršių banguoti – panašiai kaip jūros bangos; jos nesklinda gilyn į Žemę, tačiau paviršiumi gali nukeliauti šimtus kilometrų	Priklauso nuo gylio: 3,2 km · s^{-1} pačiame paviršiuje



23.13 pav. **P tipo, S tipo ir paviršinės seisminės bangos**

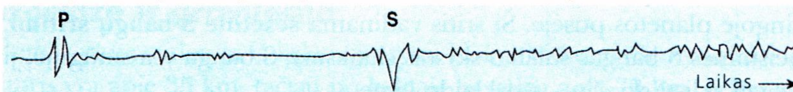


a) Skersinių Žemės paviršiaus svyravimų matavimas



b) Išilginių Žemės paviršiaus svyravimų matavimas

23.14 pav. **Seismografo, skirto vertikaliems ir horizontaliems Žemės paviršiaus svyravimams matuoti, konstrukcija**



23.15 pav. **Netoli Sumatros salos įvykusio žemės drebėjimo seismogramos, kuriose matyti užregistruotos P tipo ir S tipo bangos**

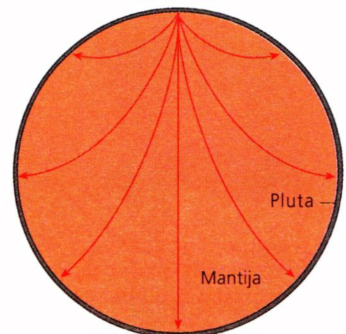
Seismometro veikimo principas yra toks. Didelės masės kūnas įtvirtinamas spyruoklėmis (23.14 pav.), prie jo pritvirtinamas rašiklis, kuris brėžia ant nuolat besisukančio būgno liniją. Kai Žemė rami, rašiklis brėžia tiesią liniją. Kai tik Žemės paviršius sujudinamas, visa konstrukcija taip pat sukruta, ir ant būgno lieka atitinkama žymė. 23.15 paveiksle pavaizduota tipinė **seismograma**, kurioje parodyta, kaip atrodo užregistruotas žemės drebėjimas.

Seisminės bangos – Žemės gelmių zondai

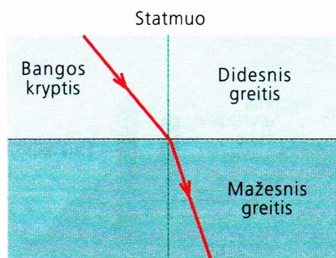
23.16 paveiksle parodyta, kaip galėtų sklisti žemės drebėjimo sukeltos deformacinės bangos per įsivaizduojamą vienalytę sudarytą iš kietos medžiagos planetą. Sklidimo trajektorijos išlinkusios dėl centro link didėjančio slėgio ir temperatūros: medžiagos savybės dėl to kinta, ji pasidaro tankesnė ir tampresnė. **Visuminių seisminių bangų** (t. y. P ir S tipo bangų) sklidimo greitis v priklauso nuo abiejų nurodytų parametrų:

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}},$$

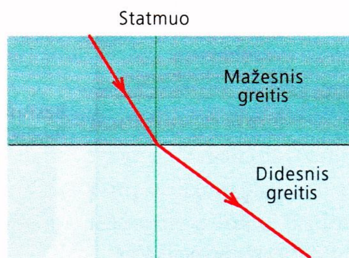
kur E yra **tamprumo konstanta**, o ρ yra medžiagos **tankis**.

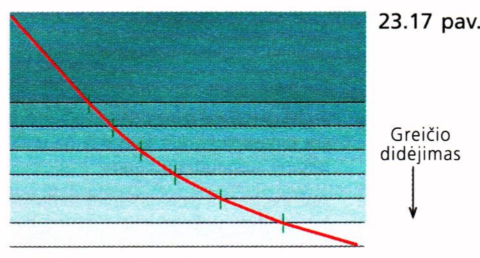


23.16 pav. **Vienalytė planeta sklindančios seisminės bangos**



a) Per skirtingų terpių ribą praeinanti banga





23.17 pav.

b) Bangos lūžimas tolydinėje terpėje

Didėjant gyliui E didėja greičiau negu ρ, todėl juo gilyn, juo greičiau banga sklinda. Kai bangos greitis aplinkoje kinta, pasireiškia lūžimo efektas. Tolydus greičio kitimas sukelia tolydų lūžimą, todėl bangos kryptis kinta palaipsniui (23.17 pav.).

Seisminių bangų greičio nustatymas

Seisminės stotys paskirstytos po visą Žemę. Jas visas pasiekia vienas ir tas pats Žemės paviršiaus virptelėjimas, tačiau ne tuo pačiu momentu. Apdorojus iš visų stočių surinktus duomenis, galima nustatyti seisminių bangų greičius.

Kad pavyktų nustatyti P ar S tipo seisminių bangų greičius, bangos turi būti užregistruotos bent trijose artimiausiose seisminėse stotyse. Remiantis gautais duomenimis apskaičiuojama, po kiek laiko ta pati banga turėjo pasiekti kitas stotis. Tada skaičiavimų rezultatai palyginami su atitinkamos stoties seismometrų matavimais. Seisminių bangų sklidimo greitis uolienose kinta, ir išmatavus laiką, per kurį jos nusklido, galima nustatyti jų kelią (23.18 pav.) ir greitį (23.19 pav.) įvairiuose gyliuose.

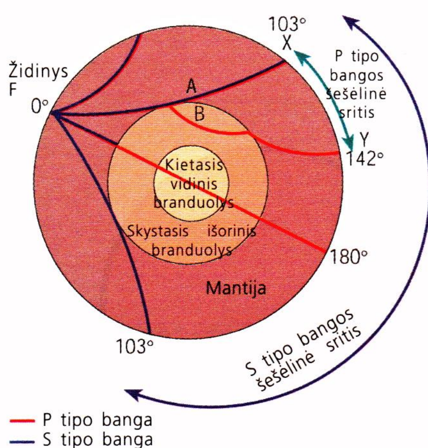
Žr. užduotį skyriaus pabaigoje.

Skaičiavimai buvo patikrinti laboratorijose atliktais eksperimentais, kuriuose buvo tiriama, kaip įvairios uolienos ir mineralai elgiasi aukštoje temperatūroje ir suslėgti. Todėl šiuo metu net ir labai toli nuo artimiausios seisminės stoties įvykusio žemės drebėjimo epicentras gali būti nustatytas labai tiksliai.

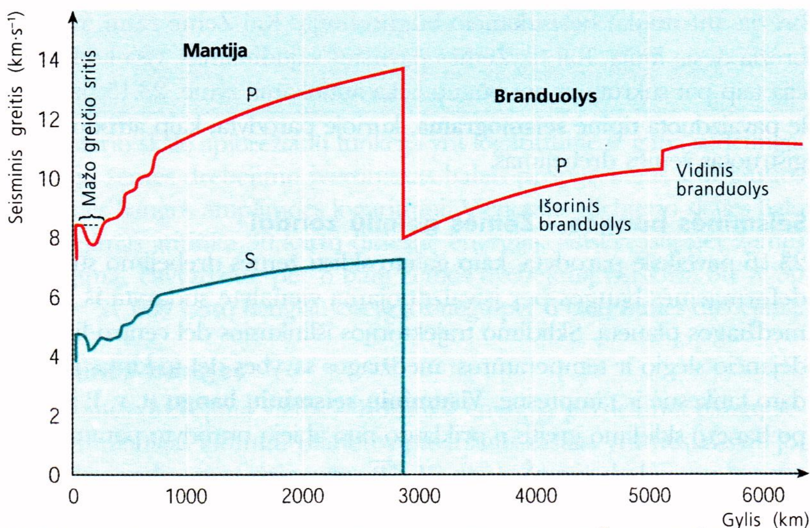
Šešėlinės sritys

Toli įvykusio žemės drebėjimo seisminės bangos pasižymi dviem savybėmis (23.18 pav.). Pirma, S tipo bangos nepasiekia didelės srities priešingoje planetos pusėje. Ši sritis vadinama **šešėline S bangų sritimi**. Seismines S bangas sulaiko skystas sluoksnis: S banga yra smūginė, ji negali sklisti skysčiu – išsisklaido jame.

P tipo bangos taip pat turi savo šešėlinę sritį, tik gerokai mažesnę. P tipo bangos yra išilginės ir gali būti perduotos skysčiu, tačiau dėl stai-



23.18 pav. S ir P tipo seisminių bangų, atsiradusių žemės drebėjimo F taške metu, galimi sklidimo keliai



23.19 pav. **S ir P tipo seisminių bangų greičių kitimas Žemės gelmėse**

gaus medžiagos tankio pokyčio ties skysčio ir kietojo kūno riba banga smarkiai lūžta. 23.18 paveiksle parodytos dvi iš šaltinio F viena šalia kitos sklindančios P tipo bangos. Banga A sklinda greta ribos ir nepakitusi pasiekia tašką X. O banga B kerta ribą su kieta branduolio medžiaga, lūžta ir pasiekia tašką Y. Dėl to susidaro šešėlinė zona X–Y.

Žr. 6 klausimą.

Dirbtiniai „žemės drebėjimai"

Seisminius prietaisus gana keblu sukalibruoti: žemės drebėjimai neprognozuojami ir jų metu išsiskiria skirtingas energijos kiekis. Daug tikslesni duomenys gali būti gauti vykdant dirbtinius sprogimus Žemės plutoje. Mokslo tikslams nedideli sprogimai vykdomi gana dažnai, šis metodas ypač sėkmingai taikomas gamtinių dujų ir naftos paieškose.

Daug galingesni branduoliniai sprogdinimai buvo vykdomi nuo 1950 iki 1980 metų karo tikslais, ir vienų šalių vykdomų branduolinio ginklo bandymų poveikį galėjo išmatuoti ir kitos šalys. Šie bandymai buvo panaudoti seismometrų kalibravimui, be to, buvo surinkta daug duomenų, papildančių žinias apie Žemės vidinę struktūrą.

Seisminių bangų sklidimo duomenys akivaizdžiai parodė, kad kietasis *vidinis branduolys* sudarytas vien tik iš grynos geležies. Spėjama, kad išorinį skystą branduolio sluoksnį sudaro geležies, sidabro ir nikelio lydinys. Mantija sudaryta daugiausia iš geležies ir magnio junginių su lengvesniais elementais siliciu ir deguonimi. Tai daugiausia sudėtingi silikatiniai junginiai.

6 ŽEMĖS PLUTOS IZOSTAZĖ IR TEKTONINĖS PLOKŠTĖS

Temperatūra ir slėgis išorinėje mantijoje tokie, kad šioje srityje medžiaga yra pusiau plastinė: staiga padidėjus ją veikiančiai jėgai greitai lūžta, tačiau atspari laipsniškai kintančių jėgų poveikiui. Šios jėgos gali atsirasti dėl **gravitacijos** ir **konvekcijos**.

Izostazė ir gravitacija

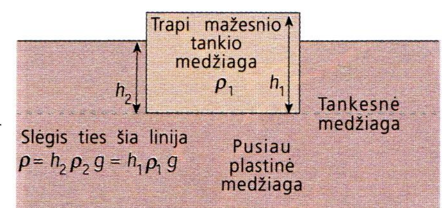
Žemės pluta sudaryta iš keleto žemynų blokų. Vidutinis žemynų blokų storis yra apie 35 km, tačiau po kalnais jis siekia apie 70 km, o žemumose tik 30 km. Tarp blokų yra plonesnis 8–9 km sluoksnis, tarsi palindęs po žemynais ir sudarantis padą vandenynams. Didelė žemynų masė įspaudžia šį sluoksnį į litosferą, kaip parodyta 23.20a) paveiksle.

Ir žemyno, ir vandenyno blokai guli ant astenosferos – minkšto, apsilydžiusio viršutinės mantijos sluoksnio. Tie blokai gali judėti aukštyn arba žemyn priklausomai nuo to, ar dėl erozijos jie lengvėja, ar dėl medžiagos kaupimosi sunkėja. Blokų pusiausvyros nusistovėjimas vadinamas **izostaze** (23.20b) pav.).

Žemynams dūlėjant susidariusi medžiaga dažniausiai nusėda sekliose vandenynų srityse. Vandenynai tose vietose netampa pastebimai seklesni, nes didėjant nuosėdų masei dugnas leidžiasi žemyn. Šiose vietose susikaupia daug žemyninės medžiagos. Manoma, kad maždaug prieš 10–30 milijonų metų susikaupusi medžiaga galėjo sujungti Eurazijos ir tada dar atskirtą Indijos žemyną. Šiuos žemynus skyrė sekli jūra, į kurią vandeningos kalnų upės prinešė daug nuosėdų. Kai nuosėdų storis (ir svoris) jūroje tapo pakankamai didelis, iš viršaus spaudžiama minkšta mantija buvo išstumta į šalis po žemynais (žr. taip pat 23.22 paveikslą 191 puslapyje). Dėl to jūros atskirtų žemynų pagrindai susilydė, spaudžiami iškėlė jūros dugną ir sujungė Eurazijos ir Indijos žemynus. Dabar toji vieta yra Himalajų dalis.



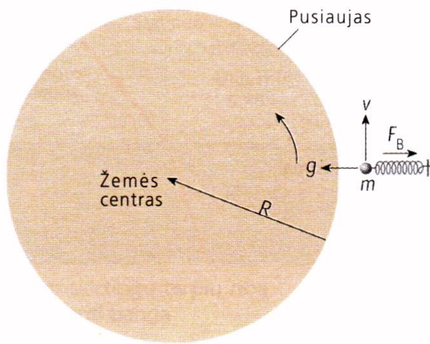
a)



b)

23.20 pav. **Izostazės principas: mažesnio tankio medžiaga grimzta į didesnio tankio medžiagą, kol slėgiai susilygina**

Žr. 7 klausimą.



Gravitacija veikia *m* masės kūną jėga, lygia *mg* niutonų.

Tą jėgą atsveria:

1. spyruoklės įtempimo jėga F_B
2. išcentrinė jėga $F_C = mv^2/R$, išlaikanti masę „orbitoje" aplink Žemę, t. y.

$mg = F_B + F_C$

Atlikdami bandymą išmatavome ne *mg*, o F_B.

23.21 pav. **Dėl išcentrinės jėgos išmatuotoji *g* reikšmė gaunama mažesnė**

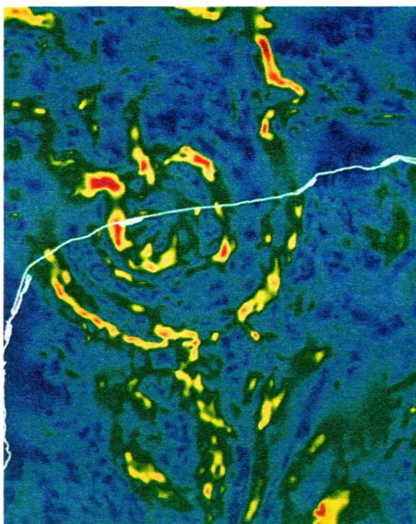
?

H Taškas pusiaujuje yra $6{,}3782 \times 10^6$ m atstumu nuo Žemės centro.

a) Koks to taško sukimosi greitis?

b) Kokia jėga reikia veikti tame taške esančio vieno kilogramo masės kūną, kad jam būtų suteiktas įcentrinis pagreitis (v^2/R)?

c) Kokią Žemės gravitacijos lauko stiprio dalį ($g = 9{,}807\ \mathrm{N \cdot kg^{-1}}$) sudaro įcentrinis pagreitis?



23.22 pav. **Čikulubo gravitacinė anomalija Jukatano pusiasalyje netoli Meksiko padėjo geologams sužinoti, kad prieš 65 milijonus metų Žemė susidūrė su masyviu asteroidu (žr. taip pat 1-os d. 57 p.)**

Gravitacinės anomalijos

Gravitacijos laukas yra ne vienodas visuose Žemės paviršiaus taškuose. Jo stiprumas *g* kinta įvairiose Žemės vietose dėl penkių priežasčių.

1 Dėl Žemės formos kintantis *g*

Žemės forma yra ne taisyklingas rutulys, o šiek tiek iš polių suplotas sferoidas. Tarp Šiaurės ir Pietų polių yra apie 10 km mažesnis atstumas negu tarp priešingų taškų pusiaujuje. Dėl to Žemės gravitacijos laukas yra ne visai sferinis (nors 3 skyriuje paprastumo dėlei tarėme, kad jis sferinis), o priklauso nuo platumos: lauko stipris yra didesnis poliuose (90° platuma) ir mažesnis pusiaujuje (0° platuma).

2 Skirtingos *g* reikšmės dėl Žemės sukimosi

Kadangi Žemė sukasi, bendra jėga, veikianti kūną, kurio masę matuojame, yra mažesnė negu yra iš tikrųjų (23.21 pav.). Taip yra dėl to, kad dėl Žemės sukimosi kūnas juda apskritimu, o tai sąlygoja *išcentrinę jėgą*. Sukimosi greitis einant link polių mažėja, todėl mažėja ir išcentrinė jėga, o *g* reikšmė didėja.

3 *g* priklausomybė nuo aukščio

Dydžio *g* reikšmė didėjant aukščiui mažėja pagal gravitacinės traukos dėsnį:

$$g = \frac{GM}{R^2},$$

kur *M* yra Žemės masė, *R* – atstumas nuo sveriamo kūno iki Žemės masės centro.

4 *g* priklausomybė nuo uolienų tankio

Žemės struktūra nėra simetriška. Plutą sudarančių uolienų tankis yra mažesnis negu mantijos, todėl keičiantis plutos storiui, keičiasi ir toje vietoje esanti gravitacinė masė. Dėl to įvairiose vietose gravitacijos jėga taip pat skirtinga. Be to netgi pati pluta yra nevienalytė, joje yra masės sankaupų, kurios taip pat sąlygoja gravitacijos lauką.

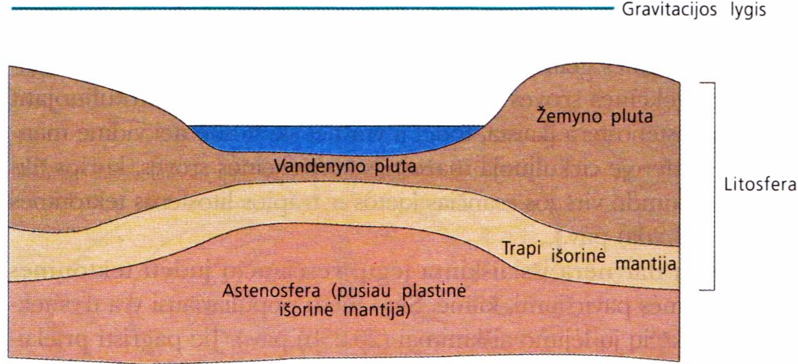
5 Izostatiniai efektai

Tarkime, žemynų spaudimas į trapią išorinę mantiją ir astenosferą (pusiau plastinę mantiją) susilpnėja. Kai medžiagos yra pusiausvyroje, didesnis žemynų tūris kompensuojamas mažesniu jį sudarančių uolienų medžiagų tankiu (23.23a) pav.). Tačiau sujudėjus tektoninėms plokštėms nusistovėjusi pusiausvyra suyra: vienos Žemę sudarančios plokštės skęsta, kitos kyla. Šie procesai sukelia gravitacines anomalijas (23.23b) ir c)).

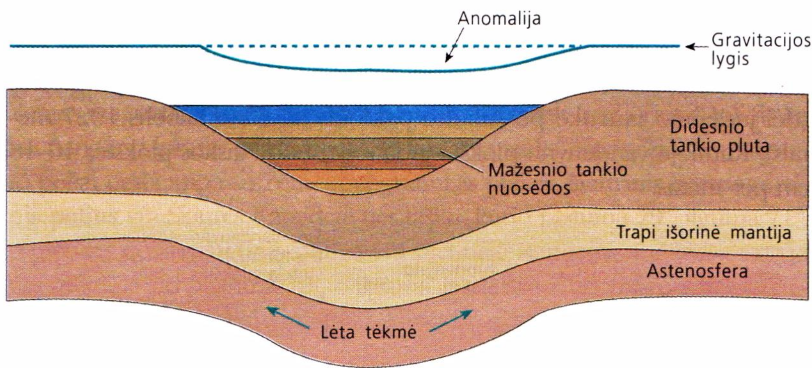
23.22 paveiksle parodyta gravitacinė anomalija aplink Čikulubą Meksikoje. Gravitacinės anomalijos yra pagrindinis įrodymas, kad ne tik Žemės vidiniai sluoksniai, bet ir pati pluta sudaryta iš skirtingo storio ir tankio pasluoksnių.

Gravitacinio lauko reikšmei konkrečioje vietoje nustatyti naudojamas prietaisas **gravimetras**: juo galima išmatuoti labai mažus iki 10^{-8} *g* dydžio nukrypimus. Gravimetrai naudojami nustatyti Žemės rutulio sritims, kuriose plutos uolienų tankis yra skirtingas. Pavyzdžiui, naftos prisodrintų uolienų tankis yra mažesnis negu kietųjų uolienų, todėl mažesnis gravitacijos laukas gali reikšti, kad toje srityje įmanoma rasti naftos. Gravitacijos matavimai gali padėti rasti tam tikrus mineralus. Pavyzdžiui, metalų prisodrintos rūdos paprastai yra tankesnės negu kitos uolienos.

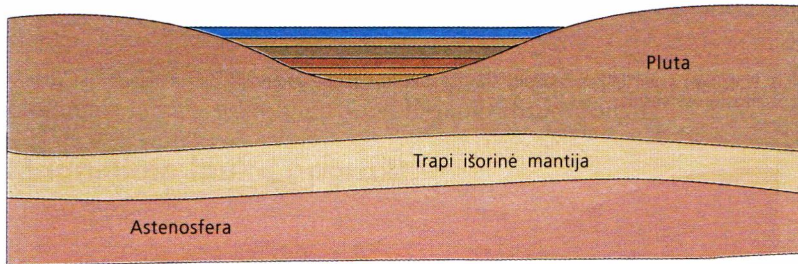
a) Pradinė stabili sistema



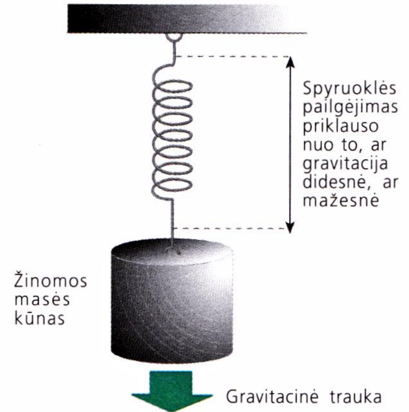
b) Dėl sausumos dūlėjimo į jūros dugną atneštos mažesnio tankio nuosėdos spaudžia didesnio tankio uolienas žemyn, dėl to *g* toje srityje sumažėja



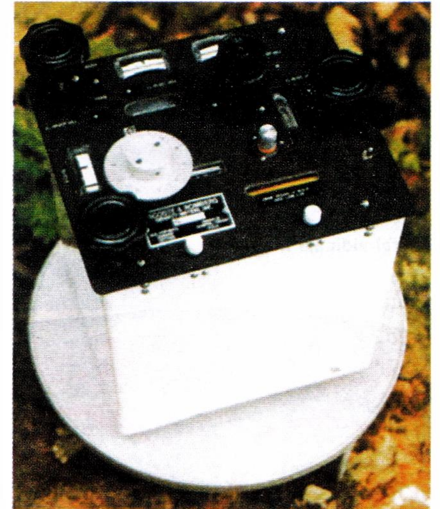
c) Po labai ilgo laiko nusistovi pusiausvyra ir gravitacija vėl pasiekia vidutinę vertę



23.23 pav. **Izostazė ir gravitacinė anomalija (kad būtų aiškiau, plutos storis padidintas)**



23.24a) pav. **Gravimetro veikimo principas**

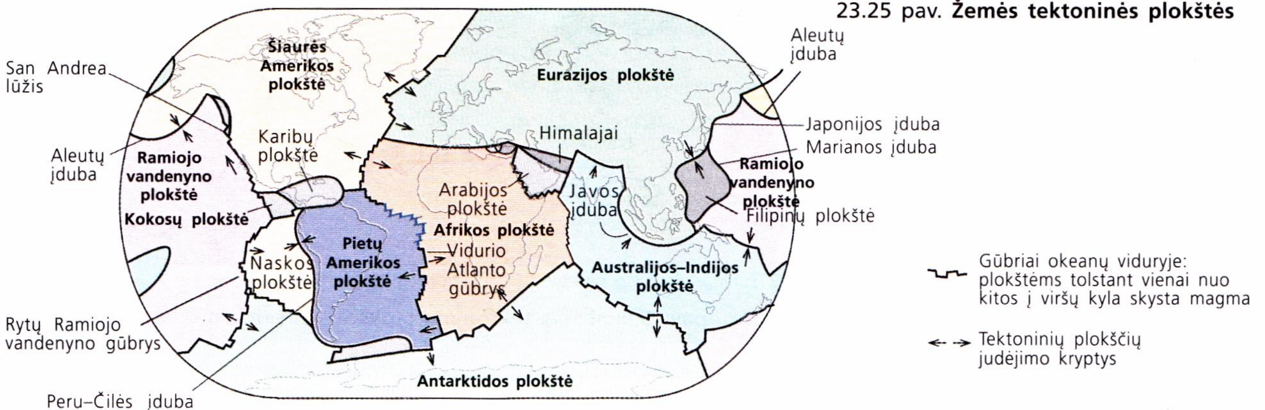


23.24b) pav. **Gravimetras**

Tektoninės plokštės ir konvekcinės jėgos

Litosfera yra trapi medžiaga, sudaryta iš septynių pagrindinių tektoninių plokščių ir keleto mažesnių (23.25 pav.). Šios plokštės slankioja virš skystojo Žemės paviršiaus (astenosferos), kartu stumdydamos ir žemynų, ir vandenynų plutą.

23.25 pav. **Žemės tektoninės plokštės**

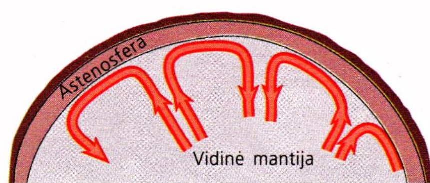


Nors ir labai lėtam, tačiau milžiniškos masės judėjimui reikia daug energijos. Manoma, kad šios energijos šaltinis yra radioaktyviųjų nuklidų, esančių Žemės gelmėse, skilimas. Ji pasireiškia tuo, jog sukuria galingas konvekcines sroves vidinėje, skystoje mantijoje. Cirkuliuojant medžiagai astenosfera įkaista, todėl ji yra net skystesnė nei vidinė mantija. Astenosferoje cirkuliuoja mažesnės konvekcinės srovės, kurios tikriausiai ir stumdo virš jos esančias kietos ir trapios litosferos tektonines plokštes (23.26a) pav.).

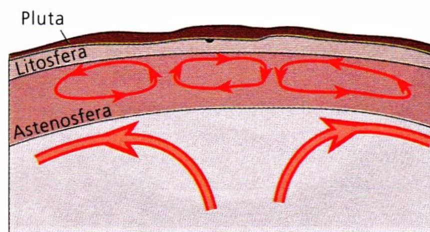
Žr. 8 ir 9 klausimus.

Iš tikrųjų dar nėra išsiaiškinta jėgų, verčiančių judėti tektonines plokštes Žemės paviršiumi, kilmė. Šiuo metu populiariausi yra trys tektoninių plokščių judėjimo aiškinimai (26.23b) pav.). Jie pagrįsti prielaida, kad konvekciniai srautai dėl trinties su litosfera sukuria tempimo jėgą. Vis dėlto ši prielaida nėra pakankamai pagrįsta, kad galėtų paaiškinti stebimą plokščių judėjimą.

Tektoninės plokštės juda įvairiais greičiais: nuo 1 cm iki 18 cm per metus. Pavyzdžiui, Atlanto vandenynas platėja 3 cm per metus greičiu (dėl judėjimo nutrūko po Atlantu paklotas telefono kabelis 1927 metais), Ramiojo vandenyno plokštė juda tolyn nuo Naskos plokštės 16–18 cm per metus.

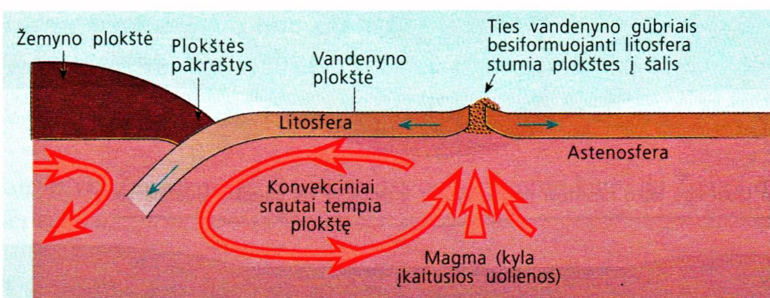


Srautai vidinėje mantijoje

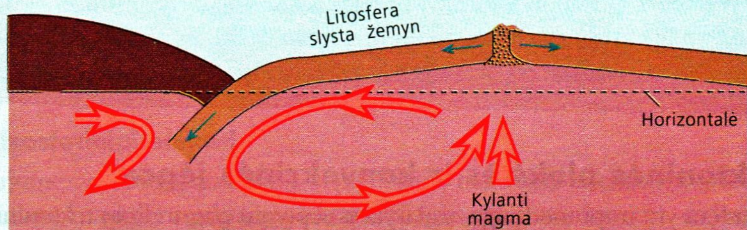


... ir astenosferoje

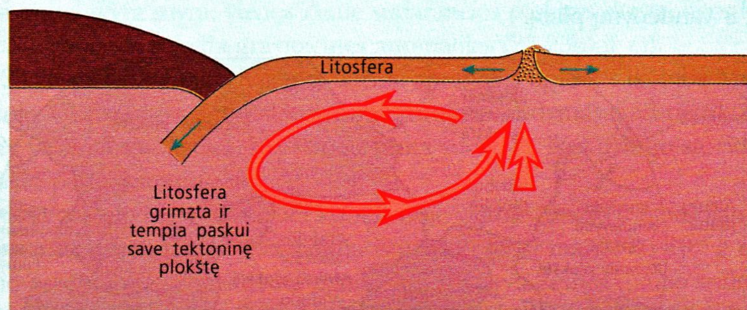
23.26a) pav. **Manoma, kad konvekcinės srovės mezosferoje ir astenosferoje sukelia jėgas, kurios priverčia judėti tektonines plokštes viena kitos atžvilgiu**



1 Priešingų krypčių konvekcinių srautų sukurtos jėgos astenosferoje ir naujos litosferos susidarymas



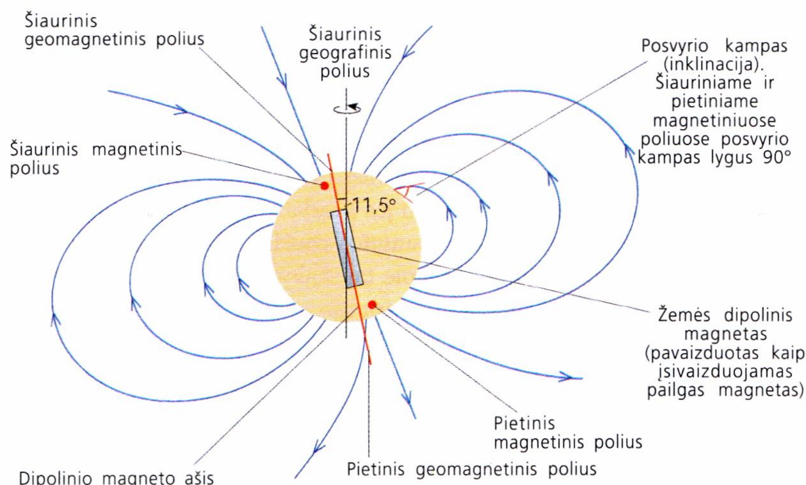
2 Jėgos tokios pat kaip ir **1** atveju, tik vandenynų plokštės dar ir slysta žemyn



3 Sunki vandenyno plokštė išsiskiria ties vandenyno viduriu

23.26b) pav. **Galimi trys tektoninių plokščių judėjimo mechanizmai**

7 GEOMAGNETIZMAS



23.27 pav. **Žemės magnetinis laukas**

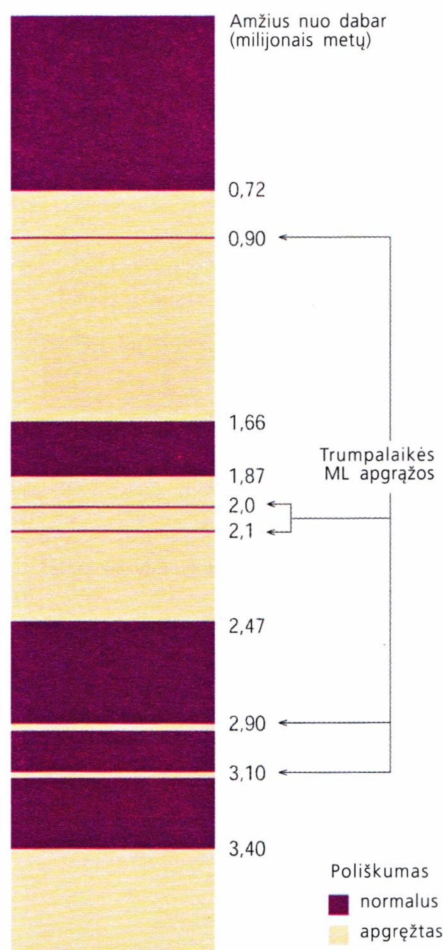
Žemės magnetinis laukas pavaizduotas 23.27 paveiksle. Žiūrint iš toli jis labai panašus į įprasto pailgo magneto kuriamą lauką. Šio milžiniško magneto poliai nesutampa su Žemės geografiniais poliais: **šiaurinis geomagnetinis polius** yra Šiaurės Kanadoje ties tašku, kurio platuma 79°, ilguma 71°, o **pietinis geomagnetinis polius** yra pietinėje Ramiojo vandenyno srityje ties tašku, kurio platuma 79°, o ilguma 109°. **Šiaurinis magnetinis** ir **pietinis magnetinis poliai** yra taškai, kuriuose magnetinės linijos nukreiptos statmenai į Žemę. Šiaurinis geomagnetinis polius pritraukia šiaurinį kompaso rodyklės galą, todėl įsivaizduojamo Žemės magneto pietinis polius turi būti ties šiauriniu geografiniu poliumi, kaip parodyta 23.27 paveiksle.

Geomagnetinių polių padėtis palengva keičiasi: magnetinė ašis slenka aplink Žemės geografinį polių – apie jos sukimosi ašį – maždaug 0,18° per metus. Manoma, kad pietinis magnetinis polius ir geologiniais laikais suko kilpas netoli geografinio poliaus.

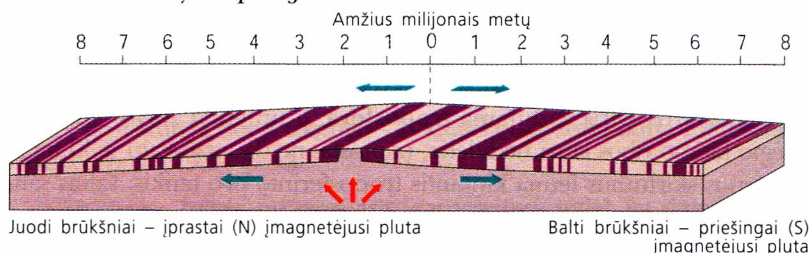
Magnetinio lauko apgrąža

Žemės geomagnetinis laukas pasižymi keista savybe: maždaug kas keletą šimtų tūkstančių metų jo kryptis pasikeičia į priešingą. Kartais nauja kryptis nesikeičia iki milijono metų, tačiau kai kada ji išsilaiko vos keletą tūkstančių metų (23.28 pav.). Pasirodo, šis **magnetinio lauko krypties kitimas** yra pagrindinis informacijos šaltinis, kuriuo remiantis buvo nustatyta, kad **žemynai slankioja** ant kontinentinių plokščių.

Išsilydžiusioje uolienoje esančias magnetines medžiagas, kuriose yra nikelio ar geležies, Žemės magnetinis laukas įmagnetina tam tikra kryptimi. Kai įkaitusios uolienos vėsta, magnetinės medžiagos sustingsta išlaikydamos įmagnetėjimo kryptį. Geomagnetinio lauko matavimai, atlikti 1950-aisiais skersai Šiaurės Atlanto vandenyno, parodė, kad uolienų įmagnetėjimas yra simetriškas vidurio Atlanto gūbrio atžvilgiu (23.29 pav.). Šie rezultatai buvo paaiškinti tik 1963 metais: slenkant žemynams Atlanto vandenynas platėja.



23.28 pav. **Žemės magnetinio lauko poliškumo kitimas per pastaruosius 4 milijonus metų**



23.29 pav. **Abiejose vandenyno gūbrio pusėse uolienų įmagnetėjimas yra simetriškas**

Gūbrys susidarė įkaitusiai giluminei medžiagai iškėlus Žemės plutą ir magmai išsiliejus į paviršių bazaltų pavidalu (23.25 pav.). Išsiliejant vis naujoms bazaltų masėms, gūbrys vis platėjo. Magmai vėstant, geležies ir nikelio įmagnetėjimo kryptį nulemia tuo metu esančio Žemės magnetinio lauko kryptis. Šie reiškiniai trunka dešimtis milijonų metų, skirtingais laikotarpiais išsilieję bazaltai yra nevienodai įmagnetinti. Tokiu būdu platėjant vandenyno dugnui susidaro milžiniška magnetinė sritis. Kuo toliau nuo gūbrio yra uolienos, tuo anksčiau jos susidarė iš magmos. Magnetinio lauko apgrąžos datos gali būti nustatytos įvairiais specialiais metodais (pavyzdžiui, radioanglies metodu, apie tai skaitykite 71 p.) datuojant uolienų pavyzdžius. Žinant magnetinės apgrąžos datas, galima apskaičiuoti gūbrio platėjimo greitį (maždaug 2–3 cm per metus).

Žr. 10 ir 11 klausimus. ■

Šiuo metu sukaupti duomenys apie kelių paskutinių milijonų metų magnetinio lauko apgrąžos datas padėjo geologams rekonstruoti žemynų judėjimą ir nustatyti apytiksles jų padėtis Žemės paviršiuje per jos gyvavimo istoriją.

Kodėl Žemė yra magnetas?

Geležis, nikelis ir jų junginiai praranda įmagnetėjimo savybę aukštesnėje nei ~600 °C temperatūroje, vadinamoje **Kiuri temperatūra**. Tai reiškia, kad karštas branduolys ir mantija negali būti nuolatiniai magnetai.

Dabartinė Žemės magnetinio lauko teorija grindžiama pusiau plastiška viršutine mantija ir skystu išoriniu branduoliu. Pagal šią teoriją magnetinio lauko šaltinis yra skystas branduolys. Jame magnetinis laukas tikriausiai 10 ar net 100 kartų stipresnis negu mantijoje, kur jis apie 10 kartų stipresnis nei planetos paviršiuje.

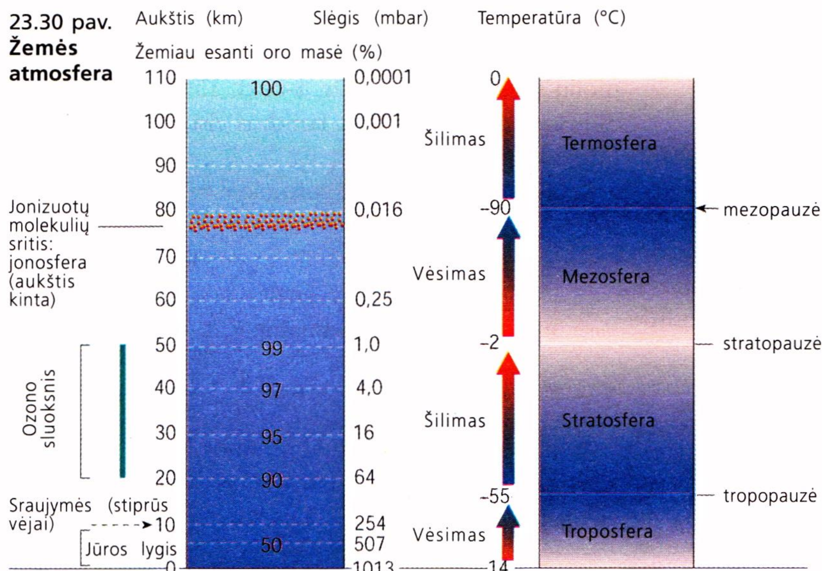
Kaistant radioaktyviam skystam Žemės branduoliui, jonizuotoje magmoje susidaro *konvekciniai srautai.* Dėl krūvių persiskirstymo atsiranda potencialų skirtumas tarp kietos viršutinės magmos ir skysto branduolio. Kai Žemė sukasi, tie krūviai pernešami apskritiminėmis trajektorijomis, todėl jas galime traktuoti kaip apskritimines sroves, kurios kuria magnetinį lauką. Tokių srovių geomagnetinio lauko poliai turėtų sutapti su geografiniais poliais. Tačiau krūviai dalyvauja dar ir sudėtingame konvekcinių srautų judėjime, todėl atsiranda ir konvekcinės kilmės elektros srovė. Ši srovė taip pat kuria magnetinį lauką. Visų srovių kuriamo magnetinio lauko suma ir yra realus Žemės geomagnetinis laukas. Kadangi skystos masės srautai ir krūvių pasiskirstymas jose kinta, tai ir geomagnetiniai poliai šiek tiek keičia savo padėtį.

Remiantis šiuo modeliu gana paprastai galima paaiškinti magnetinio lauko apgrąžą, tačiau kodėl ji vyksta – vis dar neaišku.

8 ATMOSFERA: KLIMATAS IR ORAI

Žemės atmosfera yra dujų mišinys (žr. 23.6 lentelę).

Atmosferos slėgis ties Žemės paviršiumi yra apie 10^5 Pa (orų prognozėse įprasta pateikti milibarais arba kai kur hektopaskaliais: 10^5 Pa = 1 baras = 1000 milibarų = 1000 hektopaskalių). Vietinis atmosferos slėgis kinta, jo dydis priklauso nuo virš tam tikros konkrečios vietos esančio maždaug 15 kilometro aukščio oro stulpo temperatūros ir drėgmės. Ši atmosferos sritis vadinama **troposfera**, ji nulemia „orus“ Žemėje. Slėgio kitimo ribos labai nedidelės, paprastai ne daugiau kaip ±30 mbarų. Šiuos skirtumus lemia kintantis troposferinio oro tankis: šaltas sausas oras yra tankesnis už karštą drėgną. 23.30 paveiksle pateiktos atmosferos svarbiausios charakteristikos.



23.30 pav. Žemės atmosfera

Dujos	Atmosferos dalis (%) pagal tūrį	pagal masę
N_2	78,08	75,52
O_2	20,95	23,14
H_2O	0,1–2,8	0,06–1,70
Ar	0,93	1,29
CO_2	0,03	0,05

23.6 lentelė. **Atmosferą sudarančios dujos**

Oro slėgis sparčiai mažėja didėjant aukščiui maždaug pagal eksponentės dėsnį:

$$p = p_0 e^{-kh},$$

kur p yra slėgis aukštyje h, o p_0 – slėgis ties jūros lygiu; k yra konstanta. Šios formulės išvedimas pateiktas išplėstiniame intarpe 196 p.

Ši formulė teisinga tik tuomet, kai oro temperatūra visuose aukščiuose vienoda. Tačiau, kaip matyti 23.30 paveiksle, taip nėra.

Kylant aukštyn oras vėsta iki pat troposferos viršaus, **stratosferoje** jo temperatūra didėja, po to oras vėl atvėsta **mezosferoje** ir įkaista **termosferoje**. Tokią temperatūros kaitą sąlygoja įvairiuose aukščiuose skirtingi Saulės energijos ir Žemės spinduliuotės sugerties procesai, taip pat laipsniškas oro vėsimas didėjant aukščiui.

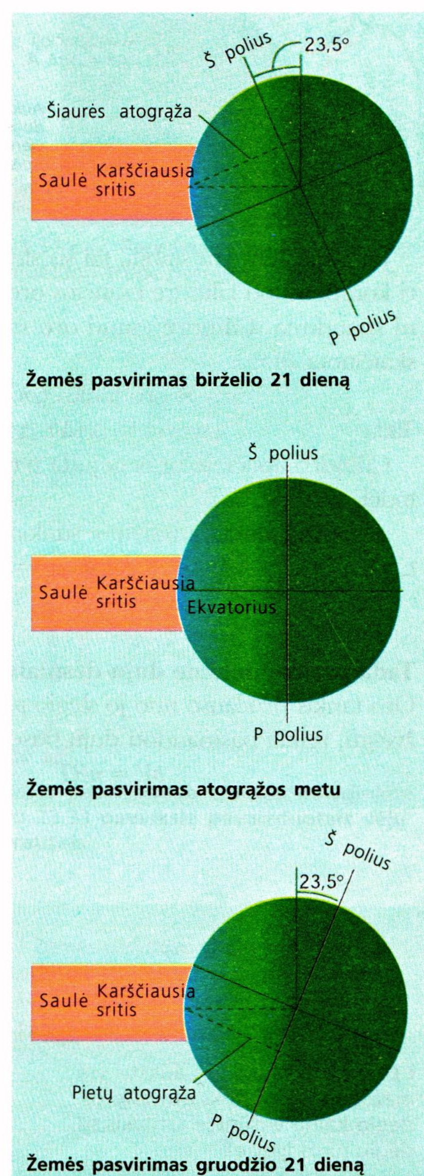
Bendras oro vėsimas gali būti paaiškinamas dujų plėtimusi į *žemesnio slėgio* sritį. Pažemio oras sąveikauja su Saulės įkaitintu planetos paviršiumi sausumoje bei vandenynuose ir todėl sušyla. Šiltas oras plečiasi ir kyla pernešdamas energiją į didesnius aukščius. Kai dujos plečiasi, jos atlieka darbą, praranda energijos ir dėl to atvėsta: šis procesas vadinamas **adiabatiniu** vėsimu, turint galvoje, kad dujų išorinė aplinka nei aušina, nei šildo.

Pasaulinė oro cirkuliacija

Jeigu Žemės sukimosi ašis būtų statmena orbitos apie Saulę plokštumai, tai Saulė nuolatos kaitintų tik pusiaujinę sritį. Čia būtų karščiausia, o poliuose – šalčiausia. Terminė konvekcija suformuotų atmosferoje nuolatinius srautus, kurie atrodytų maždaug taip, kaip pavaizduota 23.34 paveiksle 529 puslapyje.

Karštas oras kiltų virš pusiaujo, atvėstų ir leistųsi žemyn maždaug ties 30° platuma. Šis oras toliau judėtų link pusiaujo ir pakeistų aukštyn pakilusį orą. Tuo būdu susidarytų daugiau mažiau stabilūs oro srautai, vadinami **pasatiniais vėjais**.

Iš tikrųjų Žemės sukimosi ašis šiek tiek pasvirusi, todėl labiausiai Saulės kaitinama sritis (o kartu ir pasatiniai vėjai) juda aukštyn ir žemyn apie pusiaujinę sritį priklausomai nuo metų sezono. Vasara kuriame nors pusrutulyje būna tuomet, kai karščiausia zona būna toliausiai į jį įsiskverbusi (23.31 pav.).



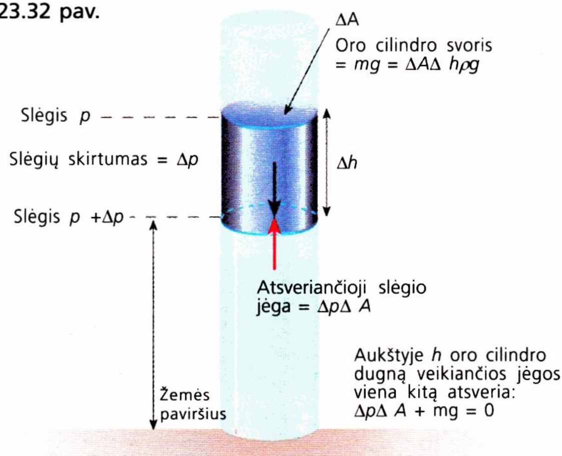
23.31 pav. **Žemės sukimosi ašis yra pasvirusi, todėl, jai skriejant orbita aplink Saulę, klimato juostos kinta pusiaujo atžvilgiu**

Atmosferos slėgio priklausomybė nuo aukščio virš Žemės paviršiaus

Pirmiausia – jėgų pusiausvyra

23.32 paveiksle pavaizduotas įsivaizduojamas atmosferos oro stulpas. Jame pažymėtas nedidelis cilindras, kurio aukštis Δh, o skerspjūvis ΔA. Tarkime, kad cilindro aukštis toks mažas, kad oro tankis jo apačioje ir viršuje vienodas. Tačiau oro slėgis cilindro apačioje ir viršuje šiek tiek skiriasi: šį slėgių skirtumą pažymėkime Δp.

23.32 pav.



Jei atmosfera yra stabili, tai šis slėgių skirtumas turi kompensuoti cilindre esančios oro masės gravitacinį spaudimą. Cilindre esanti oro masė gali būti apskaičiuota šitaip:

tūris × oro tankis (ρ) × g

Tada svoris = $\Delta A \Delta h\, \rho g$

Cilindro apačioje oras nejuda (yra pusiausvyroje), todėl

slėgio spaudimas aukštyn + sunkio jėga žemyn = 0,

t. y.: $\Delta p \Delta A + \Delta A \Delta h\, \rho g = 0$

$$\Delta p = -\Delta h\, \rho g \qquad [1]$$

Tada pasinaudokime dujų dėsniais

Oro tankis priklauso nuo jo slėgio p. Norint į tai atsižvelgti, reikia pasinaudoti dujų būsenos lygtimi

$$pV = nRT \qquad [2]$$

R yra universalioji dujų konstanta, o n yra dujų molių skaičius tūryje V (žr. 1-os d. 156 p.). Oras yra dujų mišinys, todėl n yra bendras visų dujų, esančių tūryje V, molių skaičius.

Tankį išreikškime pagal formulę r = m/V. Dujų masė tūryje V, kuriame yra n molių, lygi sandaugai nm, kur m yra vidutinė dujų molio masė. Tada gauname:

$$\rho = nm/V \qquad [3]$$

Pasinaudoję [2] lygtimi gauname V: $V = nRT/p$.

Tada gauname reiškinį $\rho = nm\dfrac{p}{nRT} = \dfrac{pm}{RT} = Kp$ [4]

Šioje lygtyje m ir R yra konstantos, be to, tariame, kad ir temperatūra yra pastovi. Visas konstantas suvienijame į konstantą K.

Tada sujungiame lygtis

Įrašę tankio išraišką į [1] lygtį, gauname:
$\Delta p = -\Delta h\, \rho g = -\Delta h K p g$. Gautą lygtį perrašome taip:

$$\frac{\Delta p}{p} = -k\Delta h \qquad [5]$$

kur k yra kita konstanta (= Kg); tariame, kad laisvojo kritimo pagreitis atmosferoje taip pat yra pastovus.

Galiausiai suintegruojame lygtį

Norint rasti formulę, pagal kurią būtų galima apskaičiuoti atmosferos slėgį bet kuriame aukštyje, reikia [5] lygtį suintegruoti.

$$\int_{p_0}^{p} \frac{dp}{p} = -k\int_0^h dh.$$

Suintegravę gauname $\ln p - \ln p_0 = -kh$
arba $\ln p/p_0 = -kh$.

Gautąją išraišką galima perrašyti taip:

$$\frac{p}{p_0} = e^{-kh} \text{ arba } p = p_0 e^{-kh}.$$

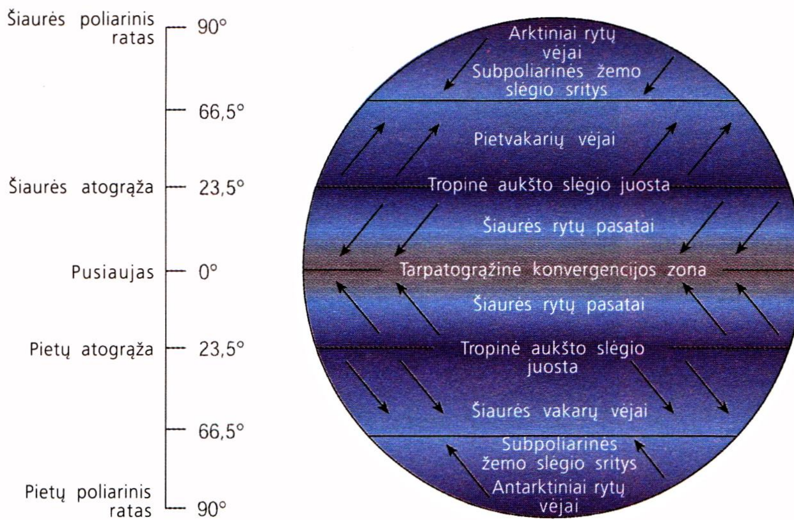
Koriolio efektas

Žemė sukasi rytų kryptimi po judančio oro sluoksniu. Dėl to, žiūrint iš pusiaujo, vėjai, pučiantys iš šiaurės, atrodo tarsi jie pūstų iš šiaurės rytų, o ne tiesia kryptimi iš šiaurės į pietus. Sukimasis taip pat pakeičia ir iš pietinio poliaus bei nuo ekvatoriaus į šiaurę ir pietus pučiančių vėjų kryptis.

Šį reiškinį galima paaiškinti tuo, kad arti polių esantys Žemės paviršiaus taškai sukasi lėčiau negu esantys pusiaujo srityje: jie per tą patį laiką apsuka mažesnio spindulio apskritimą. Dėl to oro masės, judančios pastoviu greičiu nuo poliaus link pusiaujo, sukimosi greitis pavir-



I Everesto viršukalnės aukštis yra maždaug 8 km. Koks atmosferos slėgio kalno viršūnėje santykis su slėgiu jūros lygyje?

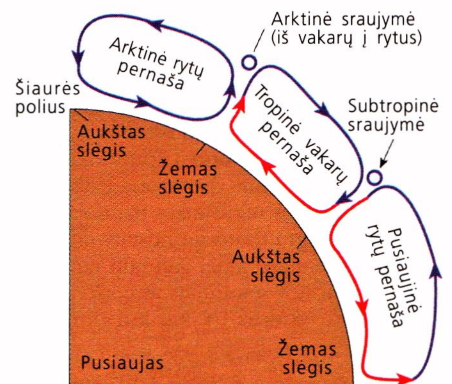


23.33 pav. **Pagrindinės vėjų juostos Žemės paviršiuje**

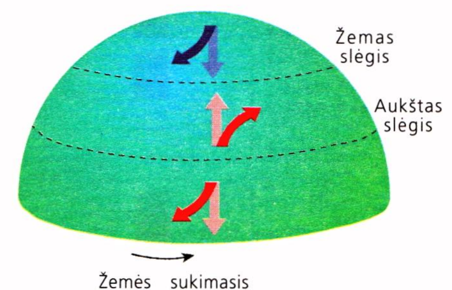
šiaus atžvilgiu palaipsniui mažėja ir judėjimo trajektorija išsikreivina taip, kaip pavaizduota 23.35 paveiksle.

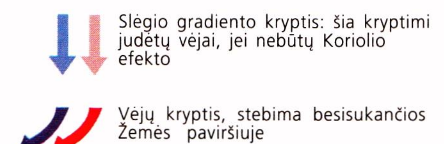
Oro masės, judančios iš pusiaujo link šiaurinio poliaus, sukasi Žemės paviršiaus atžvilgiu laikrodžio rodyklės kryptimi, o link pietų poliaus – prieš laikrodžio rodyklę. Šiose šiltose oro masėse yra daug vandens garų, kurie susikaupia garuojant dideliems vandenynų plotams. Didesnėse platumose toks oras atvėsta, susidaro žemo slėgio zonos, kondensuojasi debesys ir iškrinta daug kritulių.

Žemė realiai *nekuria* jėgų, kurios keistų oro masių judėjimo kryptis: oro masių trajektorijos kreivumą sąlygoja Žemės ir oro masių reliatyvaus judėjimo vienas kito atžvilgiu pobūdis.



23.34 pav. **Paprastas trijų kontūrų oro judėjimo troposferoje modelis**





23.35 pav. **Koriolio efektas. Palyginkite su 23.33 paveiksle pavaizduotais vėjų srautais**

Trintis

Žemės įtaka vėjams pasireiškia tuo, kad tarp judančių oro masių ir planetos paviršiaus veikia trinties jėgos. Dėl to net kelių dešimčių metrų aukštyje vėjų greitis yra gerokai didesnis negu ties Žemės paviršiumi. Tai galima pastebėti paprasčiausiai iškėlus vėliavą ant aukšto stiebo.

Atmosferos dujos

Atmosferos sudėtis pateikta 23.6 lentelėje (195 p.). Tačiau toje lentelėje nėra dviejų gausiausiai Saulės sistemoje esančių elementų: vandenilio ir helio, nes Žemės atmosferoje šių elementų dujų yra labai nedideli kiekiai. Taip yra iš dalies dėl didelio vandenilio dujų cheminio aktyvumo: didžioji jo dalis yra susijungusi su deguonimi ir sudaro vandens molekules. Be to, daug vandenilio yra iškasamuose hidrokabonatuose (nafta, dujos) ir gyvuose organizmuose (karbonhidratuose).

Helis Žemėje susidaro nuolatos skylant radioaktyviesiems branduoliams: daugelio skilimo reakcijų produktas yra α dalelės – helio jonai. Tačiau ir helio, ir vandenilio atomai palieka Žemę paprasčiausiai dėl to, kad atmosfera yra per karšta. Atmosferą nuo išsisklaidymo sulaiko planetos gravitacinė trauka. Tačiau bet koks objektas, kurio greitis didesnis už tam tikrą vertę, gali ištrūkti iš gravitacijos lauko (pavyzdžiui, vandenilis ir helis). Šis greitis vadinamas planetos **antruoju kosminiu greičiu** (platesnį paaiškinimą skaitykite 1-os d. 67 p.). Ištrūkti iš Žemės traukos lauko reikalingas greitis yra $1{,}1 \times 104\ \mathrm{m{\cdot}s^{-1}}$.

?

Į Žemės palydovo greitį stacionarioje orbitoje su įcentriniu pagreičiu sieja toks sąryšis: $a = mv^2/R$.

Palydovas skrenda 800 km aukščio orbita, Žemės spindulys lygus 6400 km, o laisvojo kritimo pagreitis tegul bus lygus $9{,}8\ \mathrm{N{\cdot}kg^{-1}}$. Įvertinkite palydovo skriejimo greitį ir apsisukimo periodą.

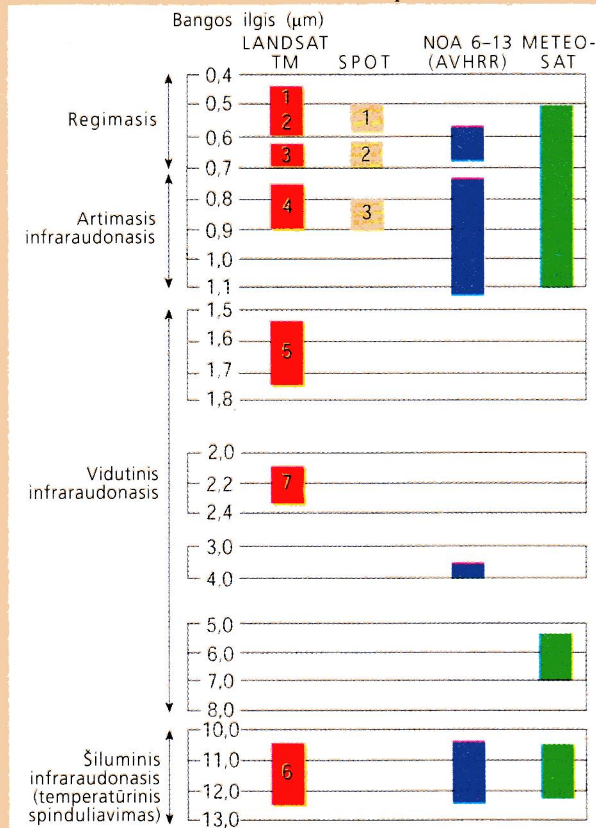
ŽEMĖS STEBĖJIMAS IŠ PALYDOVŲ

DIRBTINIAI ŽEMĖS PALYDOVAI nuolatos stebi atmosferą ir Žemės paviršių. Kaip aprašyta 1-os d. 4-ame skyriuje, palydovai gali būti iškelti į pusiaujinę arba polinę orbitas.

Pusiaujiniai palydovai – tai geostacionarūs (geosinchroniniai) palydovai, skriejantys maždaug 36 000 km aukštyje virš ekvatoriaus. Jų apsisukimo aplink Žemę trukmė atitinka pačios planetos apsisukimo apie savo ašį periodą, todėl tokie palydovai tarsi „kybo“ tame pačiame taške virš paviršiaus. Norint stebėti visą planetos paviršių, reikia į orbitą iškelti kelis tokius palydovus, nutolusius vienodais atstumais. Pavyzdžiui, Žemę fotografuoja šeši meteorologiniai palydovai: METEOSAT (Europa), GOES E, GOES W, TIROS (JAV), Himawari (Japonija), INSAT (Indija). Kiekvienas šių palydovų fotografuoja ketvirtadalį Žemės kas 30 minučių trijose spektro srityse: regimajame, viduriniame infraraudonajame ir šiluminiame diapazonuose (23.26 pav.).

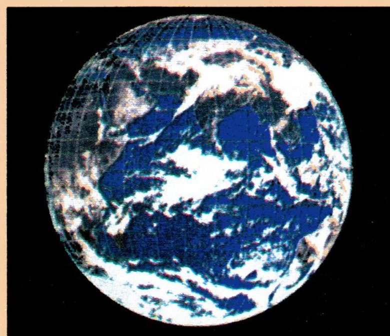
Fotografijos regimuosiuose spinduliuose rodo debesų dangą. Šiluminių infraraudonųjų spindulių bangos ilgis yra ties Žemės šiluminio spinduliavimo maksimumu, todėl šio diapazono fotografijomis nustatoma paviršiaus temperatūra. Artimieji infraraudonieji spinduliai gali prasiskverbti pro debesis, todėl šiame diapazone galima fotografuoti planetos paviršių. Tokios nuotraukos naudojamos potvynių, apledėjimų ar apsnigtų teritorijų nustatymui.

Ne visi bangos ilgiai gali būti naudojami fotografavimui, nes kai kuriuos spindulius atmosfera labai smarkiai sugeria. Atmosfera skaidri tik kai kurioms spektro sritims. Šios

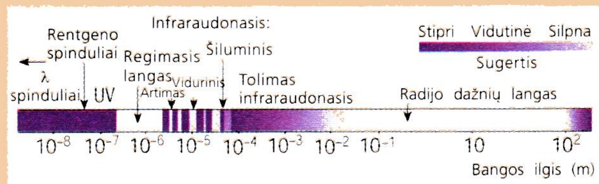


23.36 pav. **Bangos ilgių diapazonai, kuriuose kaupiami Žemės meteorologiniai duomenys pagal pagrindinę palydovinio stebėjimo programą. Skaitmenys 1–7 nurodo skirtingus bangų ilgių diapazonus, kurie aprašyti 4-ame skyriuje**

■ Žr. 12 ir 13 klausimus.



23.37 pav. **Meteorologinių sąlygų vienoje Žemės pusėje atvaizdas, gautas NOAA palydovu**



23.38 pav. **Atmosferos elektromagnetinių bangų pralaidumo langai**

spektro sritys vadinamos **atmosferos langais**; jos parodytos 23.38 paveiksle.

Poliniai palydovai skrieja trajektorijomis šiaurės–pietų kryptimi maždaug 700–1000 km aukštyje. Šių palydovų apsisukimo periodas yra apie 100 minučių. Jų jutikliai surenka duomenis nuo siauros Žemės paviršiaus juostos, praslenkančios tiesiai po palydovu. Kadangi Žemė po palydovu sukasi, tai per kelis apsisukimus gali būti surinkti duomenys apie visą planetos paviršių. Laikas, reikalingas tiems duomenims sukaupti, priklauso nuo palydovo apsisukimo periodo ir jo jutikliais aprėpiamos planetos paviršiaus juostos pločio. Pavyzdžiui, LANDSAT palydovo, kuris skirtas sausumos augalijai tirti (pavyzdžiui, derliaus prognozei), stebimos paviršiaus juostos plotis 185 km, o visą paviršių jis nufotografuoja per 16 parų. Šis duomenų surinkimo metodas vadinamas **išilgine skleidžiančiąja radiometrija**.

Atvaizdų skyra

Galutinių atvaizdų skyra priklauso nuo fotoaparato šviesai jautrių taškų tankio. Kuo didesnis plotas fotografuojamas, tuo mažiau detalių gali būti užfiksuota viename taške. Pavyzdžiui, mažiausias plotas, kurį apima vienas meteorologinio palydovo fotokameros taškas, yra 2,5 km². Tokios skyros visiškai pakanka pagrindiniams meteorologiniams dėsningumams nustatyti.

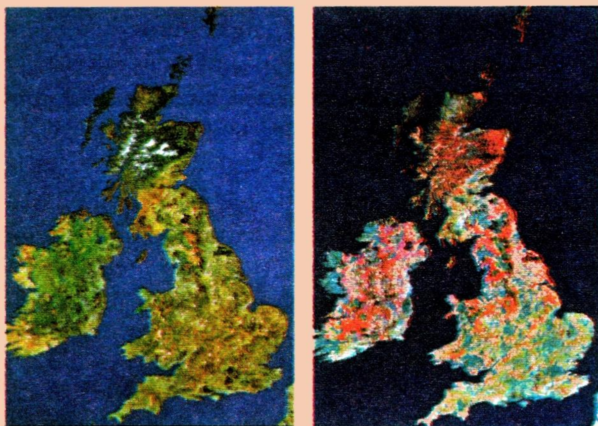
Polinių palydovų gaunami atvaizdai yra daug smulkesni. Vieno skrydžio apie Žemę metu jie apima juostą, kurios plotis svyruoja maždaug 100–185 km, o viename taške telpa nuo 10 m² (SPOT) iki 30 m² (LANDSAT TM). Gali būti gauti net ir stereovaizdai: tiesiog detektorius reikia pasukti skirtingu kampu skrendant virš tos pačios teritorijos. Kuo smulkesnį atvaizdą norima gauti, tuo daugiau laiko reikia didelio ploto atvaizdui sudaryti.

Šiuolaikiniai duomenys yra skaitmeniniai, jų kokybė labai aukšta, fotografavimo bangos ilgiai yra tiksliai fiksuoti ir nutolę vienas nuo kito labai mažais intervalais. Dėl to tos pačios kokybės skaitmeniniai atvaizdai yra gerokai pigesni negu naudojant įprastus fotografavimo metodus.

Šiuo metu vykdoma keletas palydovinio stebėjimo programų. Dvi programas vykdo JAV: Nacionalinės okeanografijos ir atmosferos administravimo (NOAA) programa ir LANDSAT programa. Europoje garsiausios yra prancūzų

SPOT, Europos kosminės agentūros ERS1 (Earth Resource Satellites – 1991) ir ERS2 (1994) bei Pakrančių zonos spalvinis skleistuvas (CZCS Coastal Zone Colour Scanner).

Kaip palydovai kaupia informaciją
Dar kartą žvilgtelėkime į 23.26 paveikslą, kuriame parodyti įvairių palydovinių stebėjimo programų naudojami bangų ilgių diapazonai. Elektroniniai jutikliai suformuoja signalą kiekviename parinktame diapazone. Tada signalai siunčiami į Žemę, kur jie sujungiami ir sudaromi atvaizdai. Pavyzdžiui, **grynų spalvų atvaizdai** gali būti sudaryti sujungiant LANDSAT palydovo 1 (mėlyna), 2 (žalia) ir 3 (raudona) signalus (23.39 pav.).

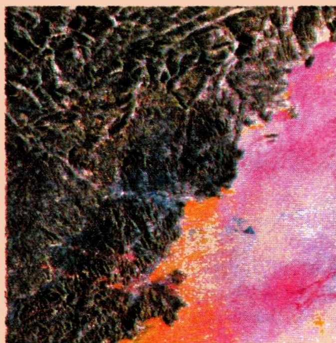


23.39 pav. **Kairėje: Britanijos salų tikrų spalvų atvaizdas, gautas LANDSAT palydovu. Dešinėje: negrynų spalvų atvaizdas. Raudona = ganyklos, oranžinė = ariama žemė, pilkai melsva = gyvenamosios sritys, šviesiai mėlyna = pakrančių smėlis ir nuosėdos, gelsvai žalia = durpynai ir spygliuočių miškai, blyški mėlynai žalia = pelkės bei šarminių dirvožemių sritys**

Netikrų spalvų atvaizdai gali išryškinti kitokias spinduliuotes, pavyzdžiui, javų pasėlių skleidžiamą spinduliuotę. 23.39 paveiksle (dešinėje) parodytas Britanijos atvaizdas, gautas iš 3 (raudona), 4 (artima infraraudona) ir 5 (tolima infraraudona) diapazonų signalo komponentų. Kompiuteriu signalai apdorojami taip, kad 3 diapazono signalo atvaizdas būtų mėlynos spalvos, 4 diapazono – raudonos, o 5 diapazono – žalios spalvos. 4 diapazono signalą sudaro lapų atspindėta šviesa, todėl šis signalas atskiria gyvenamąsias sritis nuo javais apsodintų ar miškingų plotų (plačiau apie tai toliau skyrelyje „Duomenų panaudojimas"). Derinant skirtingų diapazonų signalus gaunami atvaizdai, kuriuose galima išskirti teritorijas su vyraujančiu vieno ar kito tipo dirvožemiu ar uolienomis, galima atskirti drėgnas sritis nuo sausringų ir t. t. Galima netgi atpažinti miškuose vyraujančių medžių rūšis, auginamų javų tipus ar jų brandumo laipsnį.

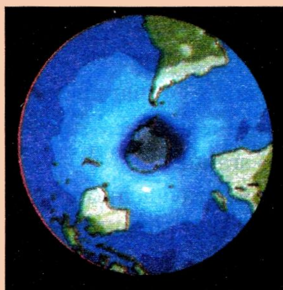
Atvaizdai gali būti dar labiau **sustiprinti** naudojant kompiuterinę techniką. Geriausios kokybės atvaizdai šiuo metu yra gaunami iš NOAA palydovų, kuriuose įtaisyti patobulinti labai aukštos skyros radiometrai, veikiantys regimajame, artimame ir šiluminiame infraraudonajame diapazonuose. Viduriniame infraraudonajame diapazone veikia Landsat palydovai, todėl dvi stebėjimo programos sėkmingai papildo viena kitą.

Ilgą laiką palydovuose buvo naudojami **pasyvieji** detektoriai: atvaizdams sudaryti jie naudoja natūralią spinduliuotę, kurią planetos paviršiaus objektai arba atspindi, arba patys spinduliuoja. Kai kurie naujausi palydovai patys siunčia signalus link Žemės paviršiaus ir registruoja atspindėtus signalus. Tokios sistemos vadinamos **aktyviosiomis**. Svarbiausia jų ypatybė yra didelis jautrumas, nes paprastai atspindėti signalai yra labai silpni. Aktyviosios sistemos naudoja **sudėtinės apertūros radarą**: kiekvieno apsisukimo metu surenkamas labai nedidelis kiekis duomenų, tačiau vėl apsisukant sukaupti duomenys sujungiami, kad būtų gautas ryškesnis vaizdas. Ši sistema tinka atstumams matuoti, todėl naudojama vandenynų lygiui nustatyti siekiant pastebėti galimus pasaulinio atšilimo padarinius: vidutinis vandenynų lygis gali būti nustatytas maždaug vieno centimetro tikslumu.

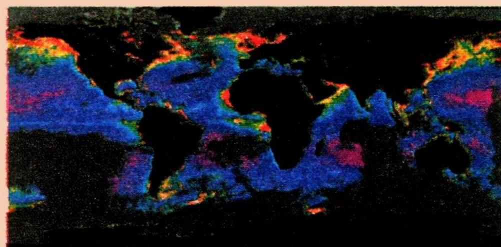


23.40 pav. **Prancūzijos pietinės pakrantės atvaizdas, kurį gavo ERS1 palydovas, naudojantis sudėtinės apertūros radarą. Jūroje nutįsę raudoni siūlai yra naftos dėmės**

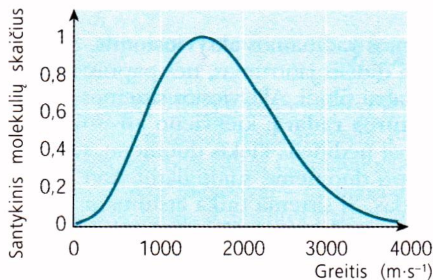
Duomenų panaudojimas
Ekvatoriniai palydovai kaupia duomenis, iš kurių sudaromi visiems jau gana įprasti meteorologiniai žemėlapiai. Polinių orbitų palydovai daugiausia naudojami sausumai zonduoti. Pavyzdžiui, javų pasėliai atskiriami pagal jų atspindėtą infraraudonąjį spektrą. SPOT palydovai kaip tik sukurti šiam tikslui. Dabartinės duomenų kaupimo ir apdorojimo galimybės įgalina prognozuoti derlių dar prieš kelis mėnesius iki jo nuėmimo. Europoje ūkininkai finansiškai skatinami neauginti tam tikrų veislių javų nustatytose teritorijose, kad tų javų spinduliuojama ar atspindima šviesa netrukdytų palydovinei informacijai kaupti. LANDSAT ir SPOT palydovai kaupia įrašus apie žemės ūkio naudmenų panaudojimą ir prižiūri, ar subsidijuojamose srityse neauginami javai.



23.41 pav. **Antarktinė ozono skylė (tamsi centrinė sritis) 1996 m. Atvaizdas gautas JAV TIROS meteorologiniu palydovu**



23.42 pav. **Fitoplanktono pasiskirstymas vandenynuose, nufotografuotas NASA Nimbus 7 tyrimų palydovu. Fitoplanktono (smulkūs vandens augalai) lygis atspindi vandens švarumą ir gyvybingumą bei srovių cirkuliaciją. Raudona = tankiausiai apgyvendinta, violetinė = rečiausiai apgyvendinta, pilka = trūksta duomenų**



23.43 pav. **Vandenilio molekulių greičių pasiskirstymas atmosferoje, kurios temperatūra 273 K**

H Pasinaudokite [1] formule ir apskaičiuokite vidutinį kvadratinį vandenilio molekulių greitį dujose, kurių temperatūra 273 K. Gautąjį dydį palyginkite su tekste pateikta verte.

Atmosferos molekulių greičiai yra skirtingi, be to, jų greičiai nuolatos kinta dėl atsitiktinių tarpusavio susidūrimų. Vidutinį molekulių greitį sąlygoja dujų temperatūra. Tipinis dujų greičių pasiskirstymas pateiktas 23.43 paveiksle.

1-os d. 160 puslapyje paaiškinta, kad vidutinė dujų, kurių temperatūra T, molekulės kinetinė energija yra lygi

$$E_K = \frac{1}{2}m\overline{c^2} = \frac{3kT}{2} \qquad [1]$$

Čia $\overline{c^2}$ yra vidutinis kvadratinis molekulių greitis, m – molekulės masė kilogramais, k – Bolcmano konstanta ir T – absoliutinė dujų temperatūra, išreikšta kelvinais. Pateiktasis sąryšis galioja *visoms* dujose esančioms molekulėms. Tai reiškia, kad tos pačios temperatūros dujose lengvesnės molekulės juda (vidutiniškai) greičiau, o sunkesnės – lėčiau.

Kaip bebūtų keista, temperatūra atmosferos viršutiniuose sluoksniuose yra gana aukšta: 273 K. Vidutinis vandenilio molekulių (masė $3{,}3 \times 10^{-27}$ kg) greitis 273 K temperatūroje yra apie $1{,}9 \times 10^3$ m·s⁻¹. Tačiau molekulių greičių pasiskirstymo sklaida į didesnių greičių pusę (23.43 pav.) rodo, kad dujose yra molekulių, kurių greitis didesnis už Žemės antrąjį kosminį greitį, lygų $1{,}1 \times 10^4$ m·s⁻¹. Tuo būdu nedidelė dalis vandenilio molekulių nuolat įstengia įveikti Žemės gravitacinės traukos barjerą ir išlekia į kosmosą. Helio atomai taip pat yra labai lengvi, todėl per ilgą laiką nemaža dalis helio taip pat palieka Žemę.

SANTRAUKA

Išnagrinėję šį skyrių jūs turėtumėte:

- Žinoti, kad radioaktyvaus datavimo metodu galima išmatuoti uolienų amžių ir tuo būdu sužinoti Žemės susidarymo principą bei nustatyti apytikslį jos amžių.
- Suprasti, kaip susidaro energijos pusiausvyra tarp atsklindančios ir siunčiamos spinduliuotės, ir kaip ją veikia atmosfera bei Saulės spinduliuotė.
- Suprasti, kas sieja vidinius Žemės gelmių energijos šaltinius su tektonine slinktimi ir link planetos paviršiaus sklindančiu šilumos srautu.
- Žinoti, kaip seisminės bangos, gravitacinio ir geomagnetinio laukų kitimas gali būti panaudotas Žemės vidinės struktūros, tektoninių plokščių bei izostazės tyrimams.
- Žinoti keturias pagrindines atmosferos sritis ir kad atmosferos slėgis didėjant aukščiui mažėja pagal eksponentės dėsnį: $p = p_0 e^{-kh}$.
- Suprasti spinduliuotės absorbcijos ir perdavimo atmosferoje principus; žinoti, kaip palydovai panaudojami atmosferai stebėti ir šiltnamio efektui kontroliuoti.
- Žinoti, kaip atmosferoje vyksta konvekcinių srovių ir vėjų cirkuliacija.
- Žinoti, kad dirbtiniai Žemės palydovai vykdo nuotolinius atmosferos ir planetos paviršiaus tyrimus pagal Landsat ir NOAA programas.

KLAUSIMAI

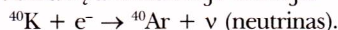
1 Pagal labiausiai paplitusią teoriją Žemė susidarė susidūrus ir sulipus mažoms metalo ir uolienų dalelėms, iš kurių buvo sudaryta proplanetė.

a) Paaiškinkite, kaip galėjo įkaisti Žemė.

b) Skaičiavimai rodo, kad norint Žemės planetoje sukauptą medžiagą išsklaidyti, reikia atlikti $2{,}5 \times 10^{32}$ J darbą įveikiant gravitacijos jėgas. Žemė daugiausiai turi geležies, kurios šiluminė talpa 500 J kg⁻¹ K⁻¹, o jos masė apie 6×10^{24} kg. Tarę, kad Žemė susidarė iš labai *šaltų* dalelių, sukritusių į bendrą traukos centrą, įvertinkite Žemės temperatūrą tuoj po jos susidarymo.

c) Kaip manote, ar pirmapradė Žemė buvo tokia karšta, kaip rodo jūsų skaičiavimai? Pagrįskite atsakymą.

2 Kalio-40 izotopas skyla, kai jo branduolys pagauna elektroną, besisukantį artimiausioje orbitoje:


$^{40}K + e^- \rightarrow {}^{40}Ar + \nu$ (neutrinas).

Šio proceso pusėjimo trukmė lygi $1{,}3 \times 10^9$ metų. Argonas paprastai lieka surištas kristalinėje gardelėje, kurioje buvo ir kalis, jeigu tik tas kristalas neįkaitinamas. Argono cheminis aktyvumas labai silpnas.

Kalio koncentracijos tyrimai rodo, kad vulkaninės kilmės kristale ^{40}K ir argono kristalų proporcija yra 2:1.

a) Kiek kalio –40 atomų buvo uolienoje, kai ji susikristalizavo? Nurodykite visas prielaidas, kuriomis naudojotės atsakydami į šį klausimą.

b) Nustatykite šios uolienos amžių. (Skilimo konstanta yra lygi $0{,}693/T$, kur T yra pusėjimo trukmė.)

3 Venera yra $1{,}08 \times 10^{11}$ m atstumu nuo Saulės, o jos skersmuo $1{,}2 \times 10^{7}$ m.

a) Saulės spinduliuojama galia $3{,}8 \times 10^{26}$ W. Apskaičiuokite, kiek energijos krinta į vieną kvadratinį metrą ties Veneros orbita.

b) Ši energija palyginti didelė, todėl įkaitina Venerą. Kokia turi būti Veneros temperatūra, kad nusistovėtų pusiausvyra tarp iš Saulės kritusio ir iš planetos išėjusio energijos kiekio?

c) Iš tikrųjų Veneros paviršiaus temperatūra yra 460 °C. Kaip ši vertė gali būti suderinta su b) gautu rezultatu? (Stefano-Bolcmano konstanta lygi $5{,}7 \times 10^{-8}$ W·m^{-2} K^{-4}).

4 Šiltnamio efektą nulemia tam tikros dujos, susikaupusios atmosferoje.

a) Kokia šių dujų įtaka vidutinei Žemės paviršiaus temperatūrai?

b) Paaiškinkite, kodėl šis efektas vadinamas *šiltnamio* efektu?

5, 6 ir 12 klausimai yra paimti iš Londono universiteto egzaminų ir vertinimo komisijos sudaryto pavyzdinio užduočių rinkinio ir pritaikyti šiam vadovėliui.

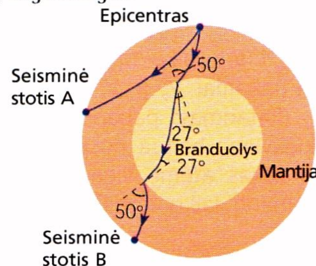
5

a) Paaiškinkite *šiltnamio efektą*. Kokių dujų, sukeliančių šiltnamio efektą, Žemės atmosferoje yra daugiausia?

b) Kodėl yra svarbu, kad Žemės atmosferoje būtų šiltnamio efektą sukeliančių dujų?

c) Nurodykite du skirtingus atmosferinio anglies dioksido šaltinius ir gaudykles.

6 23.K16 paveiksle pateiktas supaprastintas Žemės pjūvis ir dvi seisminių bangų trajektorijos.



23.K16 pav.

a) Paaiškinkite, kodėl šios bangos sklinda kreivomis trajektorijomis.

b) Kokiu būdu A stotyje esantis seismometras gali būti panaudotas atstumui iki epicentro nustatyti?

c) Kodėl B stotyje užregistruotas signalas nenaudojamas šiam atstumui nustatyti?

d) Naudodamiesi paveiksle pateiktais duomenimis, apskaičiuokite seisminių bangų greitį Žemės branduolyje, jei jų greitis mantijoje yra 13,6 km·s^{-1}?

7 Kas yra izostazė?

Kontinentai daugiausia sudaryti iš granito, kurio tankis ρ_g = 2800 kg·m^{-3}. Po juo yra uoliena, vadinama peridotitu, kurio tankis ρ_p = 3300 kg·m^{-3}.

a) Nubraižykite schemą, kurioje pažymėkite stačiakampį granito gabalą, „plaukiojantį peridotito jūroje“. Gylį, kuriame yra granito dugnas, pažymėkite **X**, o granito aukštį virš peridotito lygio **Y**.

b) Pagalvokite, koks turėtų būti slėgis ties granito dugnu. Įrodykite, kad teisingas toks sąryšis: $\rho_p X = \rho_g(X + Y)$.

c) Vidutiniškai žemynai iškyla iki 5 km virš peridotito lygio. Koks tada žemynų storis?

8 Paaiškinkite, kuo skiriasi *žemynų* pluta nuo *vandenynų plutos*.

9 Kokie yra pagrindiniai *litosferos* ir *astenosferos* skirtumai.

10 Koks geomagnetizmo vaidmuo tektoninių plokščių teorijoje?

11 6-ajame dešimtmetyje vykdyto Giliųjų jūros gręžinių projekto metu buvo imami vulkaninės kilmės uolienų pavyzdžiai skirtinguose atstumuose nuo Vidurio Atlanto gūbrio. Pavyzdžių amžius buvo nustatytas pagal magnetinių anomalijų ir radioaktyviojo datavimo metodus. Kai kurių gręžinių duomenys pateikti 23.K11 lentelėje.

23.K11 lentelė

Gręžinio numeris	14	15	16	17	18	19	20	21
Nuotolis nuo Vidurio Atlanto gūbrio (km)	730	420	220	710	500	1010	1280	1680
Amžius (10^6 metų)	39	24	10	32	27	48	67	75

a) Nubraižykite uolienų amžiaus priklausomybę nuo atstumo iki Vidurio Atlanto gūbrio.

b) Pakomentuokite šios kreivės ypatumus.

c) Pasinaudodami grafiku įvertinkite Atlanto vandenyno platėjimo greitį.

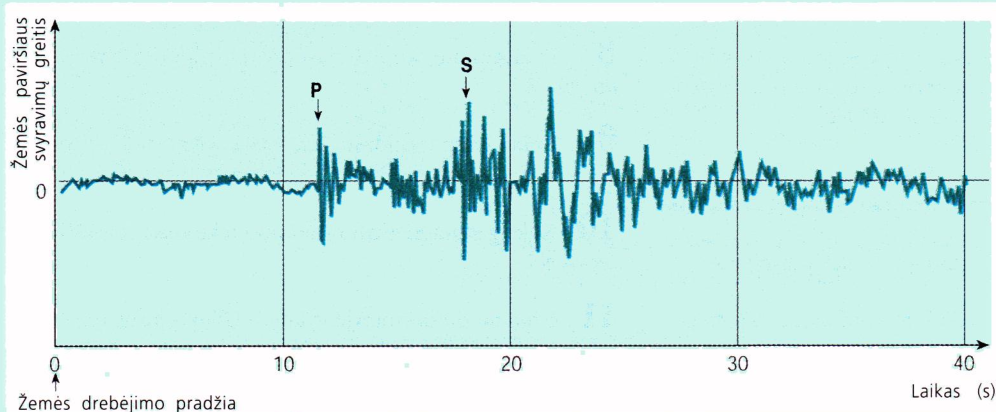
12 Geostacionarieji palydovai skrieja 36 000 km aukštyje virš Žemės paviršiaus. Žemės spindulys yra 6400 km. Apskaičiuokite polinės orbitos palydovo apsisukimo periodą, jei jis skrieja 800 km aukštyje virš Žemės paviršiaus, pagal tokį dėsnį:
(orbitos periodas)^2 = konstanta × (orbitos spindulys)^3.
Kaip polinių ir geostacionarių orbitų palydovų meteorologinėms prognozėms surinkti duomenys papildo vieni kitus?

13 23.37 paveiksle pateikti dirbtinių Žemės palydovų bangų ilgių diapazonai. Paaiškinkite, kaip pasirenkami bangos ilgiai.

Užduotis

ŽEMĖS DREBĖJIMO EPICENTRO NUSTATYMAS

23.U1 paveiksle parodyta tipinis seismografo įrenginyje užfiksuotas Žemės drebėjimo įrašas. P tipo bangos seisminę stotį pasiekia anksčiau negu S tipo bangos, nes jos sklinda greičiau. Tarkime, viršutiniame Žemės plutos sluoksnyje P bangos sklinda 6 km·s^{-1} greičiu, o S tipo 3,5 km·s^{-1}. Pagal seismografo duomenis galima nustatyti tik S bangos vėlavimo trukmę.



23.U1 pav. **Seismogramos, kuriose matyti, kada atsklinda P ir S tipo seisminės bangos**

1

a) Perrašykite lentelę ir ją užpildykite: įrašykite, kokį nuotolį P ir S tipo bangos nusklido per nurodytą laiką po Žemės drebėjimo.

Laikas (s)	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
P bangos kelias (km)										
S bangos kelias (km)										

b) Nubraižykite abiejų bangų nueito kelio priklausomybės nuo laiko grafiką.

c) Naudodamiesi grafiku nustatykite atstumą nuo seisminės stoties iki žemės drebėjimo, kurio sukeltų svyravimų įrašas pavaizduotas 23.U1 paveiksle, epicentro.

2

a) Paaiškinkite, kaip galima nustatyti žemės drebėjimo epicentro padėtį pagal kelių skirtingų seisminių stočių duomenis apie S tipo bangų vėlavimą P bangų atžvilgiu. Kiek mažiausiai reikia seismogramų, kad būtų galima tai atlikti?

b) Parodykite, kad atstumas nuo žemės drebėjimo epicentro iki seismometro gali būti apskaičiuotas pagal formulę:

$$D = T\frac{V_S V_P}{V_P - V_S},$$

kur T yra laiko tarpas tarp P ir S bangų, sklindančių atitinkamai V_P ir V_S greičiais.

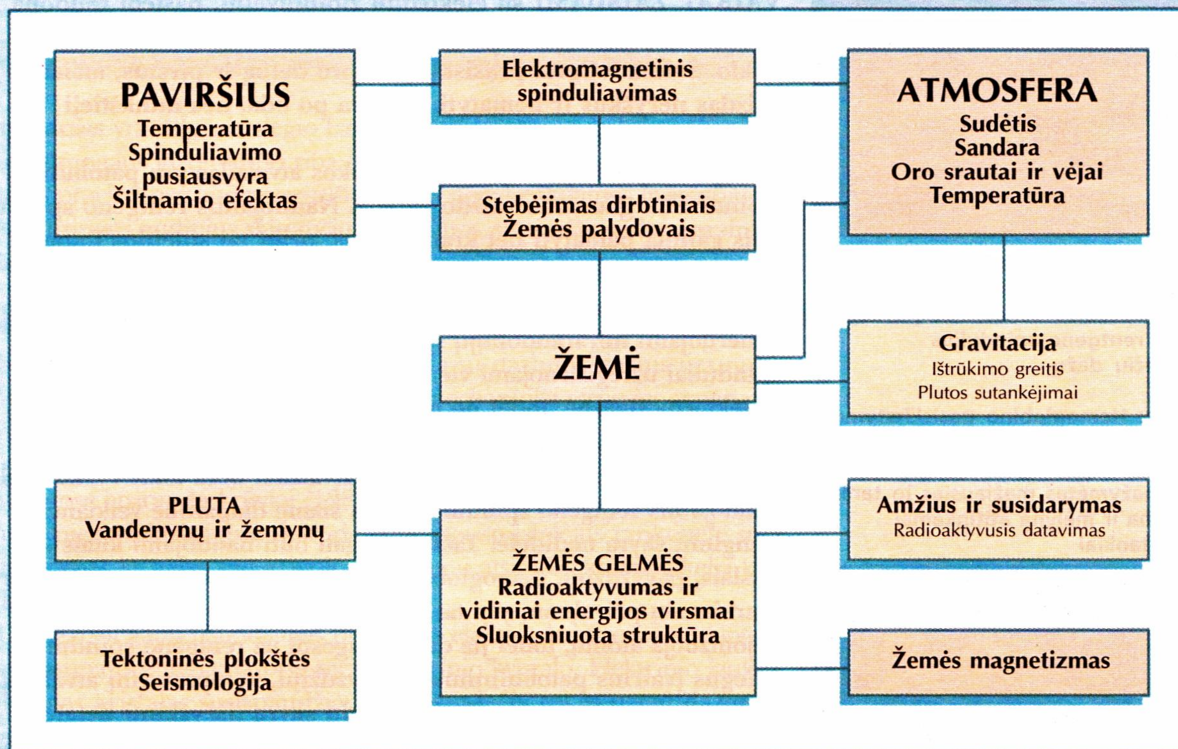
(Patarimas: pabandykite išreikšti laiką, per kurį kiekviena banga nusklinda atstumą D, o po to gautas išraiškas atėmę vieną iš kitos, gausite bangas skiriantį laiko tarpą.)

Pastaba

Net ir šios srities profesionalai naudoja grafinius metodus, nes bangų sklidimo greičiai yra nepastovūs, kai atstumas nuo seisminės stoties iki žemės drebėjimo epicentro labai didelis. Taip yra dėl to, kad bangos sklinda per skirtingų uolienų sluoksnius ir jų trajektorijos išsikreivina.

ŽEMĖ IR JOS ATMOSFERA

Šioje skyriaus schemoje pateiktos svarbiausios sąvokos apie Žemės struktūrą, jos energijos pusiausvyrą ir atmosferos įtaką energijos pernešimui. Naudodamiesi schema pasitikrinkite, ar teisingai supratote pagrindines mintis, kurias būtina žinoti pagal jūsų studijuojamą programą.

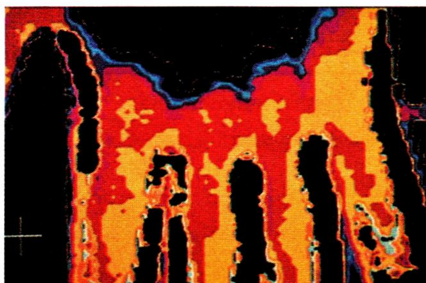


24 Medicininė fizika



Viršuje: Rankos atvaizdas, gautas naudojantis rentgeno spinduliais. Ryškiai matomos venos, nes į kraują suleista rentgeno spindulius sugeriančių dažų

Apačioje: Hemoglobino pasiskirstymo atvaizdas, gautas naudojantis infraraudonaisiais spinduliais. Geltona spalva pažymėtas mažiausias jo tankis, o raudona ir mėlyna atitinkamai didesni tankiai



VAIKAI, ŽAISDAMI su elektriniu žibintuvėliu, pastebi raudoną švytėjimą, sklindantį pro jų ranką, prispaustą prie žibintuvėlio stiklo. Šviesa lengvai prasiskverbia pro delną ir pirštus, tačiau vaizdas neryškus ir nematyti, kas yra po oda, nes minkštieji audiniai išsklaido šviesą.

Rentgeno spinduliais apšviestos rankos atvaizdas yra patobulinta žibintuvėliu gaunamo vaizdo versija. Naudojantis rentgeno spinduliais galima pamatyti net kraujagysles, prieš tai suleidus fotonus sugeriančių dažų.

Visai kitoks vaizdas gaunamas, kai naudojami labai trumpi lazerio generuojami infraraudonųjų spindulių impulsai. Visi tiesiai praėję spinduliai užregistruojami vienu metu, o išsklaidytų spindulių trajektorija ilgesnė, todėl jie užtrunka ilgiau ir jų įrenginys neregistruoja. Šiuo atveju taip pat gali būti gautas ryškus atvaizdas. Infraraudonaisiais spinduliais gauti atvaizdai nėra tokie ryškūs kaip naudojantis rentgeno spinduliais, nes šiame diapazone veikiančių įrenginių skyra nedidelė. Tačiau jie gali būti naudojami kitais tikslais, pavyzdžiui, hemoglobino kiekiui kraujyje nustatyti. Vienas svarbiausių privalumų yra tas, kad infraraudonieji spinduliai nejonizuoja atomų, todėl jie daug saugesni už rentgeno spindulius. Įdiegus įvairius patobulinimus, pavyzdžiui, kompiuterinį atvaizdų apdorojimą, galima pagerinti atvaizdų skyrą (išryškinti detales), todėl infraraudonuosiuose spinduliuose gaunamų atvaizdų technologija galėtų tapti labai saugiu ir pacientams, ir medikams medicinos metodu.

Šis skyrius sudarytas iš dviejų dalių: A dalyje nagrinėjama fizikos reikšmė **medicininei diagnostikai** (ligos išaiškinimui), o B dalyje – **terapijai** (gydymui). Daugiausia paliesime šiuolaikinėje medicinoje naudojamus vaizdų kūrimo metodus, pagrįstus ultragarso, rentgeno, radioaktyvumo, branduolių magnetinio rezonanso reiškiniais, taip pat trumpai apžvelgsime lazerių naudojimo sritis. Visi šie metodai gali būti taikomi ligų diagnozei, kai kurie jų sėkmingai naudojami ir terapijoje.

A DALIS: FIZIKA IR LIGŲ DIAGNOZĖ

Įgudęs stebėtojas gali daug sužinoti apie žmogaus kūno sveikatą jį liesdamas, tyrinėdamas jo šalinamas medžiagas, klausydamasis vidinių kūno garsų. Dažnai pacientas pats gali nusakyti alinančių skausmų pobūdį ir vietą. Tačiau norėdami ištyrinėti ligą nuodugniau, iki pat devynioliktojo amžiaus pabaigos gydytojai buvo priversti naudoti **invazinius metodus**, kurių metu organas būdavo tyrinėjimo tikslais tiesiog įpjaunamas. Ši procedūra buvo rizikinga dėl galimų komplikacijų, šoko ar infekcijos.

Situacija visiškai pasikeitė, kai V. Rentgenas (*Wilhelm Konrad Röntgen*) 1895 m. atrado spindulius, vėliau pavadintus jo vardu. Viename pirmųjų jo gautų atvaizdų buvo matyti jo žmonos rankos kaulai ir ant piršto užmautas vestuvinis žiedas. Po kelių savaičių gydytojai jau

turėjo savadarbes rentgeno spindulių lempas, kuriomis galėjo tyrinėti lūžusius kaulus ir kitas vidines kūno struktūras.

Rentgeno spinduliai yra vienas iš **neinvazinių** metodų pavyzdžių, kai galima tyrinėti vidaus organus nežalojant kūno. Šiuo metu gydytojai gali rinktis įvairias neinvazines (ir dažnai daug mažiau pavojingas) diagnostikos priemones, kurios gali būti sėkmingai pritaikytos ir gydymui.

1 ATVAIZDŲ GAVIMAS ULTRAGARSU

Ultragarsas yra išilginės slėgio bangos, kurių dažnis gerokai viršija viršutinę žmogaus girdimumo ribą (>20 kHz). Mažo intensyvumo garso bangos praeina pro audinius visiškai jiems nepakenkdamos ir atsispindi nuo skirtingus audinius skiriančių ribų. Šiuos atspindžius **ultragarsinis vaizdų skleistuvas** panaudoja vidinių organų atvaizdams gauti.

Pjezoelektrinis keitiklis

Tipinių ultragarsinės diagnostikos prietaisų darbinis dažnis yra nuo 1 MHz iki 5 MHz. Tokio aukšto dažnio mechaniniai virpesiai generuojami panaudojant pjezoelektrinį efektą. Trumpai paaiškinsime šio efekto esmę. Suspaudus kai kuriuos kristalus, tokius kaip kvarcas (SiO_2), jų paviršiuose atsiranda krūviai (128 p.). Šis efektas panaudojamas buitiniuose pjezoelektriniuose dujų degikliuose: spustelėjus rankenėlę suspaudžiamas kristalas, ant kristalo plokštumų atsiradęs krūvis sukelia kibirkštį, kuri ir uždega dujas.

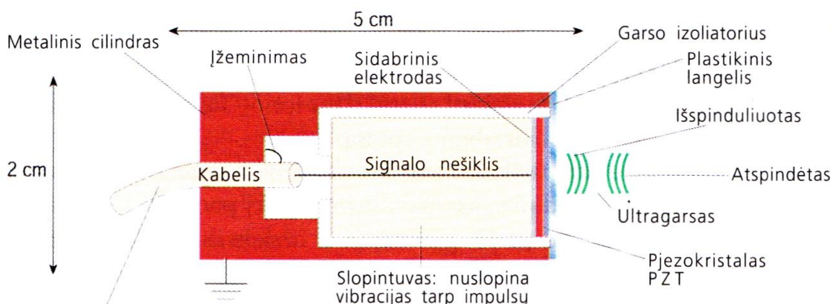
Žr. 1 ir 2 klausimus.

Ultragarsui gauti naudojamas priešingas efektas. Aukšto dažnio kintamoji įtampa prijungiama prie pjezoelektrinio kristalo. Elektrinio lauko veikiamas kristalas susispaudžia ir vėl išsiplečia tokiu pačiu dažniu. Šios kristalo vibracijos ir sukelia mechanines ultragarso bangas. Kristalas stipriausiai vibruoja tada, kai elektrinio lauko dažnis atitinka kristalo **rezonansinį dažnį**, kurį nulemia kristalo matmenys, jo išpjovimo kryptis bei prijungtosios įtampos dydis. Pastaroji savybė leidžia keičiant įtampą priversti kristalą vibruoti reikiamu dažniu.

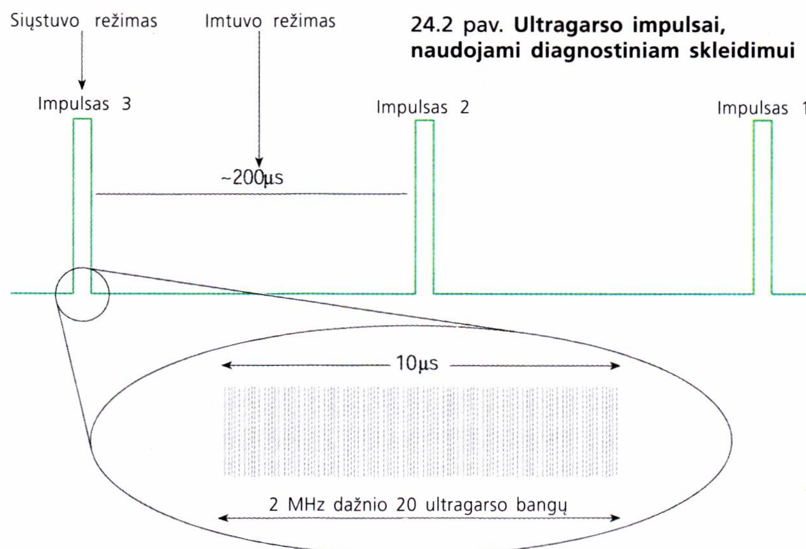


A Paaiškinkite, kas yra rezonansas, ir pateikite bent du jo pavyzdžius.

24.1 paveiksle pavaizduotas ultragarso bangų šaltinis. Jame naudojamas ne kvarcas, o švino (Pb) ir cirkonio (Zr) titanatas (Ti), sutrumpintai PZT. Šis kristalas elektrinę energiją paverčia mechanine daug efektyviau negu kvarcas, todėl generuoja stipresnį išėjimo signalą. Siųstuvas gali veikti ir kaip imtuvas: grįžtančios ultragarso bangos sukelia kristalo vibracijas, kurios savo ruožtu generuoja elektrinius signalus. Taigi pjezoelektrinis elementas yra tarsi keitiklis: kaip siųstuvas jis paverčia elektrinės įtampos svyravimus į mechaninius virpesius, o kaip imtuvas paverčia mechanines vibracijas į kintamosios įtampos signalą.

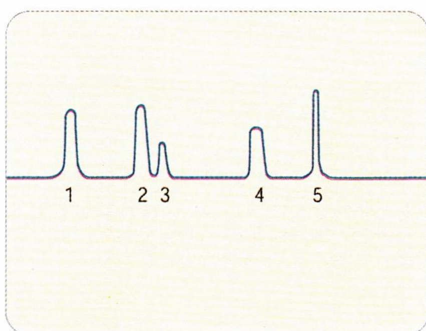


24.1 pav. **Medicinoje naudojamas pjezoelektrinis keitiklis**



24.2 pav. **Ultragarso impulsai, naudojami diagnostiniam skleidimui**

Realiose sistemose generuojamos ultragarso bangos sudarytos iš trumpų impulsų, kurių trukmė 10 μs, o du impulsus skiria kelių šimtų mikrosekundžių laiko tarpas (24.2 pav.). Paprastai ultragarso bangų vidutinė galia būna apie 0,1 mW.



24.3 pav. **A tipo atvaizdas: užregistruoti atsispindėję impulsai parodo skirtinguose gyliuose esančius atspindinčius paviršius**



24.4 pav. **Išnešioto (9 mėnesių) vaisiaus ultragarsinis atvaizdas**

Ultragarsinių atvaizdų gavimas

Kai impulsas išspinduliuotas, keitiklis perjungiamas į imtuvo režimą, kad priimtų visus atspindžius nuo skirtingų kūno vidinių sluoksnių. Visi atspindžiai turi pasiekti imtuvą iki kito impulso. Atspindžiai sustiprinami ir perduodami į osciloskopą, kuriame užregistruoti atspindžiai atvaizduojami įvairių amplitudžių impulsų seka (24.3 pav.). Tai vadinamasis **A tipo atvaizdas**. Kiekvienas impulsas rodo atspindinčio paviršiaus padėtį (nuotolį iki siųstuvo), o pagal jo aukštį galima spręsti apie atspindinčio paviršiaus savybes.

Daug paprasčiau interpretuoti **B tipo atvaizdą**. Jis gaunamas taip. Pirmiausia kūnas išilgai kelis kartus perbraukiamas ultragarsiniu zondu. Atsispindėję signalai (jų amplitudės) užregistruojami, po to duomenys kompiuteryje sujungiami į visumą ir TV ekrane gaunamas dvimatis atvaizdas.

Ultragarsas sunkiai įsiskverbia į kūną, nes jį smarkiai sugeria oras. Dėl to tarpas tarp siųstuvo ir kūno paviršiaus užpildomas skysčiu – paprastai labai plona aliejaus arba skystos celiuliozės želė plėvele.

Ultragarsinio atvaizdo kokybė

Kaip sakėme, ultragarsinis atvaizdas gaunamas iš keleto nuo įvairiuose gyliuose esančių kūno dalių atspindėtų impulsų sekų. Kiekvieno atspindžio ryškumas priklauso nuo siunčiamo skleidžiamojo impulso trukmės: jeigu impulsas bus ilgas, tai kelių sluoksnių atspindžiai persiklos ir atvaizdas bus neryškus. Tačiau jeigu impulsas labai trumpas, tai jis perduos nedidelį energijos kiekį ir atspindėti signalai gali būti per silpni, kad imtuvas juos galėtų išskirti iš trukdžių fono. Taigi reikia parinkti optimalios trukmės skleidžiantįjį impulsą.

Kita problema yra pasikartojantys atspindžiai: atspindėtas impulsas gali nuo kurio nors vidinio sluoksnio grįžti atgal į paciento kūną, po to vėl atsispindėti nuo to paties paviršiaus ir uždelstas patekti į imtuvą. Tokio proceso metu atsiranda keletas persiklojančių impulsų, kurie labai mažina atvaizdo ryškumą. Be to, atvaizdui gauti procedūra šiek tiek užtrunka, todėl, pacientui sujudėjus ar tik krustelėjus, gali atsklisti nesutampantys atvaizdo fragmentai ir susidaryti išskydęs atvaizdas.

Žr. 3 klausimą. ■

Skyra

Daikto atvaizdą sukuria bangos, kurias atspindi smulkios daikto detalės. Jei bangos ilgis per didelis, tai pasireiškia **difrakcija**. Dėl to gaunamas neryškus atvaizdas, jame nematyti smulkių detalių, t. y. tokio prietaiso **skyra** (gebėjimas išskirti smulkias detales) yra maža. Paprastai galioja tokia taisyklė: galima išskirti tik tokias detales, kurių matmenys ne mažesni už prietaiso bangų ilgį. Vadinasi, norint išskirti 1 mm dydžio kūno audinio struktūras, ultragarso bangos turi būti trumpesnės kaip 1 mm. Medicininėje diagnostikoje naudojamo ultragarso dažnis paprastai būna nuo 1 MHz iki 15 MHz, t. y. smulkiausios išskiriamos detalės gali būti apie 0,1 mm.

Plačiau apie difrakciją ir skyrą skaitykite 17 puslapyje.

Žr. 4 klausimą.

B Ultragarso greitis minkštuosiuose audiniuose yra apie 1540 m · s^{-1}. Koks turi būti ultragarso dažnis, kad būtų galima išskirti 0,1 mm dydžio objektus? (Garso greitis ore lygus 340 m · s^{-1}).

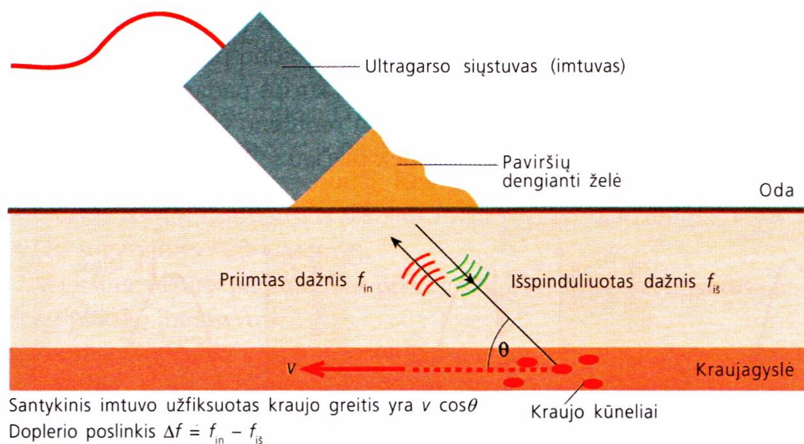
Kraujo tekėjimo greičio matavimas

Vienas iš sėkmingiausių ultragarso taikymų yra kraujo tekėjimo kraujagyslėmis greičio matavimas. Metodas pagrįstas Doplerio efektu. Ultragarsas atsispindi nuo judančių kraujo dalelių (raudonųjų kraujo kūnelių). Atsispindėjusios bangos dažnis dėl dalelių judėjimo pakinta tam tikru dydžiu, kuris priklauso nuo kraujo tekėjimo greičio. Plačiau garso bangų Doplerio efektas aprašytas 4 priede.

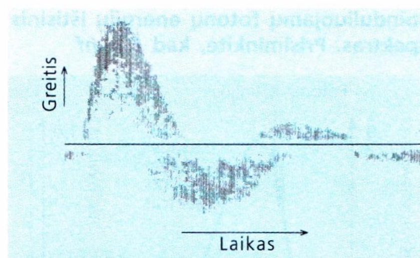
Aukštesnio dažnio (5–10 MHz) ultragarso impulsai naudojami ultragarsiniams atvaizdams sudaryti. Tarkime, ultragarso bangos krinta į kraujagyslę kampu θ (24.5 pav.). Dažnio pokytis Δf gali būti išmatuotas, o kraujo greitį galima sužinoti pagal tokią formulę:

$$\Delta f = \frac{2fv\cos\theta}{c},$$

kur c yra garso bangos greitis.



24.5 pav. **Ultragarso naudojimas kraujo greičiui matuoti**



24.6 pav. **Doplerio principu gautas ultragarsinis vaizdas arterijoje. Čia matyti, kaip kinta kraujo greitis vieno širdies susitraukimo metu**

Ultragarso keliami pavojai

Ultragarso banga perduoda energiją. Dalį jos sugeria kūno audiniai ir dėl to įšyla. Ypač gerai ultragarso bangų energiją sugeria kaulai. Tam tikro dažnio impulsai gali atitikti kai kurių nedidelių objektų rezonansinį svyravimų dažnį ir tiesiog suskaldyti tą objektą į smulkias daleles. Kad taip neatsitiktų, reikia atidžiai parinkti švitinimo trukmę ir bangų intensyvumą.

Ultragarsas gali sukelti ir **kavitaciją**. Tada atsiranda nedideli dujų burbuliukai, kurie sugeria bangų energiją, plečiasi ir gali pažeisti aplinkinį audinį. Diagnozei naudojamų dažnių srityje tokie pažeidimai mažai tikėtini, tačiau kavitacija gali būti sėkmingai panaudota gydymo tikslams (žr. 217 p.).

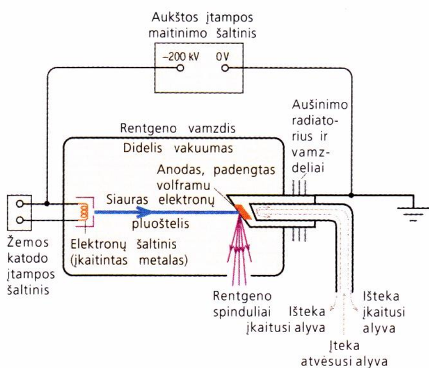
2 ATVAIZDŲ GAVIMAS RENTGENO SPINDULIAIS

Rentgeno spinduliai yra elektromagnetinis labai trumpų bangų (10^{-8}–10^{-12} m eilės) spinduliavimas. Tokius bangos ilgius atitinkančių fotonų energijos yra gana didelės (nuo 100 eV iki 1 MeV) ir gali iš atomų išmušti elektronus, t. y. juos jonizuoti. (Istoriškai taip susiklostė, kad iš pradžių niekas nežinojo, kas tie nematomi paslaptingi spinduliai, todėl jie dar vadinami X spinduliais.) Medicininės diagnostikos tikslais geriausia naudoti maždaug 30 keV energijos rentgeno spindulius. Jie gaunami apšaudant anodą 60–125 kV potencialų skirtumo įgreitintais elektronais. Rentgeno aparato schema pateikta 24.7 paveiksle.

Į anodą atsitrenkę elektronai labai greitai lėtėja; dalis elektronų prarastos energijos išspinduliuojama įvairių dažnių rentgeno spindulių pavidalu. Šie fotonai sudaro **ištisinį** spinduliavimo spektrą (24.8 pav.). Beveik visą likusią energijos dalį sugeria anodo medžiaga, kuri dėl to labai stipriai įkaista. Kad anodas neišsilydytų, būtina naudoti kiek galima didesnės lydymosi temperatūros medžiagas.

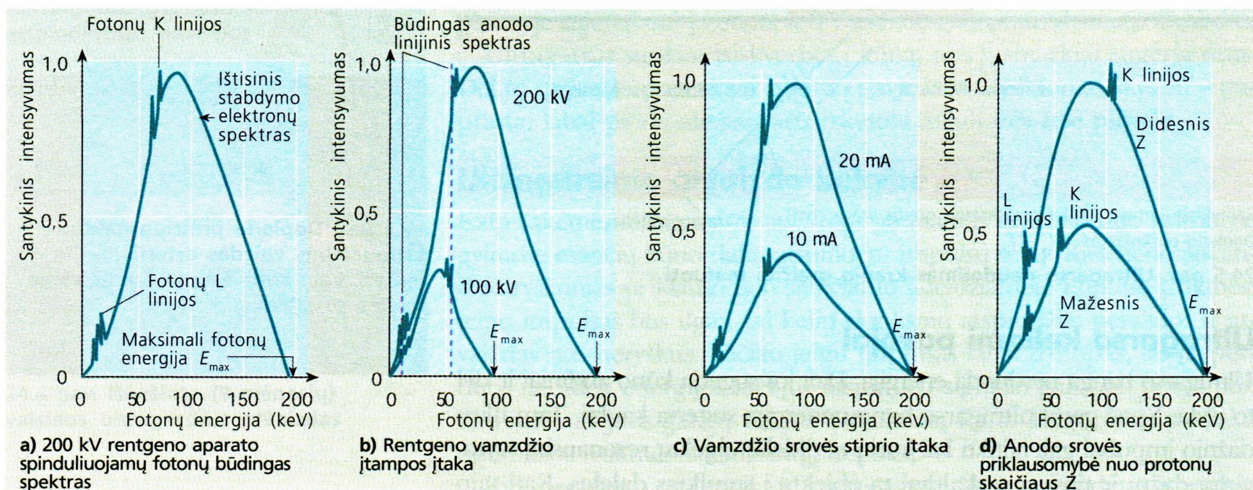
Kai kurie įgreitinti elektronai susiduria su atomų vidinių sluoksnių elektronais ir juos išmuša. Į atsiradusią laisvą vietą peršoka elektronai iš kurio nors viršutinio sluoksnio. Dėl to atomas išspinduliuoja tam tikro bangos ilgio fotoną. Atstumai tarp arti branduolio esančių elektronų energijos lygių atitinka rentgeno spindulių diapazoną. Ryškiausiai matomi šuoliai į pirmąjį ir antrąjį sluoksnį, kurie atitinkamai vadinami **K** ir **L** linijomis fotonų energijos spektre. Šie rentgeno spinduliai vadinami **būdingaisiais**, nes atspindi spinduliuojančių atomų elektroninių sluoksnių struktūrą. Pagal išspinduliuotų fotonų energiją galima atpažinti juos išspinduliavusius atomus. Būdingieji rentgeno spinduliai matomi bendrame iš anodo išlėkusių fotonų spektre kaip dvi linijų šeimos (24.8 a) pav.).

24.8 paveiksle pateikti spektrai rodo, kad fotonų pasiskirstymas pagal energijas priklauso nuo: (i) medžiagos, iš kurios padarytas anodas, (ii) elektronus greitinančios įtampos ir (iii) rentgeno vamzdžiu tekančios srovės stiprio. Panagrinėsime šiek tiek plačiau.



24.7 pav. **Rentgeno aparato schema. Anodą gerokai įkaitina į jį krintantys didelės energijos elektronai. Dėl to anodas turi būti aušinamas. Kai kuriose rentgeno aparatų konstrukcijose, kad anodo metalo paviršius tolygiau nusidėvėtų, anodas sukamas**

24.8 pav. **Rentgeno aparato spinduliuojamų fotonų energijų ištisinis spektras. Prisiminkite, kad $E = hf$**



Vamzdžio įtampa

Kuo didesnis elektronus greitinantis potencialų skirtumas, tuo didesnę kinetinę energiją E_k įgyja elektronai. Tokiems elektronams atsitrenkus į anodą, sukuriami didesnio dažnio f rentgeno spinduliai:

$$\text{maksimali fotonų energija } hf = E_k = eV,$$

kur h yra Planko konstanta, e – elektrono krūvis ir V – greitinančioji įtampa. Didžioji dalis elektronų energijos suvartojama anodui kaitinti, ir tik keletas jų visą savo energiją perduoda fotonams. 24.8b) pav. parodyta, kaip pasikeičia rentgeno spindulių spektras padidinus įtampą.



Plačiau apie fotonų energijas skaitykite 17 skyriuje.

Vamzdžiu tekanti srovė

Srovės rentgeno vamzdyje stiprėjimas reiškia, kad nuo katodo link anodo juda vis daugiau elektronų, o tai savo ruožtu reiškia didėjantį rentgeno spindulių srautą:

$$\text{intensyvumas} \propto \text{vamzdžio srovė}$$

Šis efektas parodytas 24.8c) pav.



C a) Paaiškinkite, kodėl didelės energijos rentgeno spindulių bangos yra trumpos.

b) Paaiškinkite, kodėl stiprėjant elektronų srovei didėja rentgeno fotonų skaičius, o ne jų energija.

Anodo medžiaga

Didėjant atomo eilės numeriui, t.y. protonų skaičiui branduolyje Z, didėja ir elektronų skaičius atome. Esant didesniam elektronų tankiui, didesnė įgreitinto elektrono sustabdymo tikimybė, t. y. daugiau krintančių elektronų generuoja rentgeno spindulius:

$$\text{intensyvumas} \propto Z$$

Pakeitus taikinio (anodo) medžiagą, pasikeičia ir linijinio spektro dažnis (energija). Šis dažnis atitinka atstumą tarp energijos lygių, kurie skirtinguose atomuose yra nevienodi. (Ši savybė naudojama atomams atpažinti.) Dviejų skirtingų medžiagų sukeltas skirtingas rentgeno spindulių spektras parodytas 24.8d) pav.

Radiografija: kaip rentgeno spinduliai sukuria atvaizdus

Atvaizdų kūrimo metodas naudojant rentgeno spindulius vadinamas **radiografija**. Dėl rentgeno spindulių poveikio medžiagoje gali vykti įvairūs reiškiniai. Jų metu medžiaga sugeria krintančio rentgeno spindulių pluošto fotonus (absorbuoja energiją), todėl pluošto intensyvumas silpnėja. Radiografijos metodas pagrįstas tuo, kad įvairūs audiniai rentgeno spindulius sugeria nevienodai. Rentgeno atvaizdas iš tikrųjų yra sudarytas iš *šešėlių*: tamsiausius šešėlius meta stipriausiai rentgeno spindulius sugeriantys kūno audiniai.

■ Žr. 5–7 klausimus.

Aptarsime keturis pagrindinius procesus, kurie silpnina rentgeno spindulių pluošto intensyvumą.

- **Paprastoji sklaida** vyksta tuomet, kai rentgeno fotonas „tampriai" atšoka nuo atomo branduolio: nors fotono energija ir lieka pastovi, tačiau pasikeičia kryptis, todėl toks fotonas į detektorių nepatenka.
- Fotonas gali **jonizuoti** atomą suvartodamas tam visą savo energiją. Tai iš esmės yra **fotoefektas** (žr. 32 p.) – reiškinys, kurio metu elektronas išlaisvinamas ir įgreitinamas. Skirtumas tik toks, jog rentgeno spindulių energija tokia didelė, kad šio jonizacijos proceso metu jie dažniau „išlaisvina" ne *išorinius* elektronus, o išmuša juos iš *vidinių* sluoksnių. (Paprastai sakoma, kad jonizacijos proceso metu atplėšiamas išorinio sluoksnio elektronas.)
- Kartais fotonas gali susidurti su atomo *išorinio* sluoksnio elektronu. Tada fotonas elgiasi kaip dalelė, turinti tam tikrą impulsą, kurį pasidalija su elektronu. Tokio proceso metu fotonas praranda nedidelę dalį energijos ir pakeičia skriejimo kryptį. Šis procesas vadinamas **Komptono efektu**.

- Jeigu didelės energijos fotonas pralekia labai arti branduolio, tai jis gali visiškai išnykti. Jo energija suvartojama dviem dalelėms sukurti: susidaro įprastas elektronas ir teigiamai įelektrintas elektronas, vadinamas pozitronu. Šis procesas vadinamas **porų susidarymu** (žr. 252 p.); proceso metu fotono energija paverčiama medžiaga. Fotono energija turi būti tokia didelė, kad būtų patenkintas Einšteino sąryšis $E = mc^2$, kur m yra visų atsiradusių dalelių bendra masė.

Plačiau apie porų susidarymą skaitykite 26 skyriuje.

Rentgeno spindulių slopinimas

Rentgeno spindulių sugertis kurioje nors medžiagoje, kurios masė lygi 1 kg, nusakomas **masės slopinimo koeficientu** μ_m. Kiekvienas iš keturių anksčiau nurodytų procesų priklauso nuo medžiagą sudarančių atomų numerio ir fotonų energijos. Duomenys apie slopinimo koeficiento priklausomybę nuo šiuo parametrų skirtinguose energijų intervaluose apibendrinti 24.1 lentelėje.

24.1 lentelė. **Rentgeno spindulių slopinimo medžiagoje procesai**

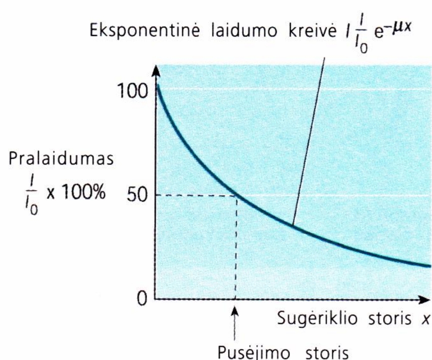
Procesas	Kaip μ_m priklauso nuo fotono energijos E	Kaip μ_m priklauso nuo atomo eilės numerio Z	Fotonų energijų intervalas, kai nurodytas procesas labiausiai tikėtinas minkštuosiuose audiniuose
Paprastoji sklaida	$\propto 1/E$	$\propto Z^2$	1–20 keV
Fotoefektas	$\propto 1/E^3$	$\propto Z^3$	1–30 keV
Komptono sklaida	Tolygiai silpnėja didėjant E	Nepriklauso nuo Z	30 keV–20 MeV
Porų susidarymas	Lėtai stiprėja didėjant E	$\propto Z^2$	per 20 MeV

D Vidutinis raumenis ir kaulus sudarančių atomų numeris yra 7,4 ir 13,9. Įvertinkite, kiek kartų skiriasi rentgeno spindulių slopinimas kauluose ir raumenyse, jei slopinimas daugiausia vyksta dėl fotoefekto.

Paprastai slopinimas silpnėja didėjant fotonų energijai, todėl didesnės energijos rentgeno spinduliai lengviau prasiskverbia pro medžiagą. Diagnostinėje radiografijoje optimali fotonų energija yra 30 keV, nes tokios energijos fotonams sklindant per kūną gaunamas geriausias biologinių audinių metamų šešėlių kontrastingumas. Taip yra dėl to, kad iš esmės slopinimo procesas 30 keV energijos srityje yra *fotoefektas*, kurio sąlygojama sugertis priklauso nuo Z trečiuoju laipsniu. Tai reiškia, kad kaulai, kuriuose daugiausiai yra kalcio ($Z = 30$), slopina rentgeno spindulius daug stipriau, negu minkštieji audiniai, kurie sudaryti daugiausia iš vandens (H_2O: $Z_H = 1$, $Z_O = 16$).

Vienalyčiai spinduliai

Labai sudėtinga gauti rentgeno spindulius, sudarytus iš vienodos energijos fotonų. Tokie spinduliai vadinami **vienalyčiais,** arba **monoenergetiniais**. Beveik vienalytis pluoštelis gali būti gautas jį filtruojant: rentgeno spindulių kelyje pastačius kliūtį, dalis fotonų bus sulaikyta. Kaip matyti 24.1 lentelėje, efektyviau stabdomi mažesnės energijos fotonai. Vadinasi, filtruoti rentgeno spinduliai tampa skvarbesniais; tokie spinduliai vadinami *kietaisiais*.



24.9a) pav. **Beveik vienalyčio rentgeno spindulių pluoštelio slopinimas**

Žr. 8 klausimą. ■

Idealiu atveju spindulių pluoštas, kurio fotonų energijos spektras artimas vienalyčiam pluoštui, silpnėja medžiagoje pagal **eksponentės dėsnį**. Būdingas medžiagos pralaidumo nuo jos storio grafikas pateiktas 24.9a) paveiksle. Tokia priklausomybė būdinga daugeliui fizikinių reiškinių, kuriuose tam tikro *dydžio pokytis proporcingas pačiam dydžiui*.

Šiuo atveju rentgeno spindulių intensyvumo sumažėjimas $-\Delta I$ yra proporcingas jų intensyvumui I ir slopinančiojo sluoksnio storiui Dx:

$$-\Delta I = \mu I \Delta x \qquad [1]$$

kur μ yra **tiesinis slopinimo koeficientas**. Duotam rentgeno spindulių bangos ilgiui tam tikroje slopinančioje medžiagoje šis koeficientas yra apibrėžtas dydis.

[1] galima perrašyti taip: $\frac{\Delta I}{I} = -\mu \Delta x$

arba analizine išraiška: $$\frac{dI}{I} = -\mu dx \qquad [2]$$

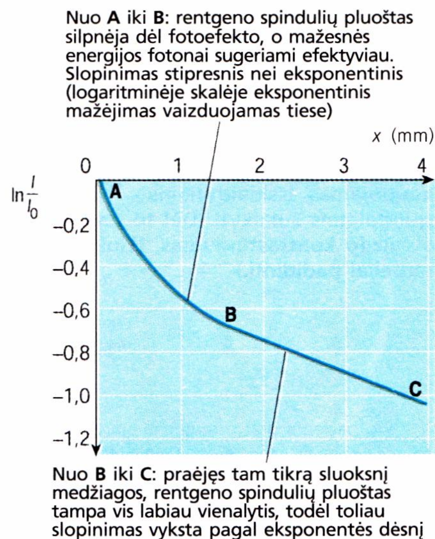
Suintegravę [2] lygtį gauname
$$\ln I = -\mu x + C \qquad [3]$$
kur I yra pluošto intensyvumas gylyje x. C yra konstanta, kurią galima rasti pagal pradinę sąlygą: kai pluoštelis dar nepradėjo skverbtis į medžiagą, t. y. $x = 0$, jo intensyvumas yra I_0. Įrašę šias reikšmes į [3], gauname:
$$\ln I_0 = C$$
C išraišką įrašome į [3] lygtį:
$$\ln I - \ln I_0 = -\mu x$$
ir suprastiname: $$\frac{I}{I_0} = e^{-\mu x} \qquad [4]$$

24.9a) paveiksle parodyta, kaip apibrėžtas **pusėjimo storis** (palyginkite su pusperiodžio (pusėjimo trukmės) sąvoka radioaktyvume): tai yra medžiagos storis, per kurį praėjęs rentgeno pluoštelio intensyvumas sumažėja perpus. Pasinaudojus [4] lygtimi galima susieti pusėjimo storį $x_{1/2}$ su tiesinio slopinimo koeficientu:
$$I = \frac{1}{2} I_0,$$
todėl: $$e^{-\mu x_{\frac{1}{2}}} = \frac{1}{2}$$
arba $$e^{\mu x_{\frac{1}{2}}} = 2$$
Logaritmuojame abi reiškinio puses ir gauname:
$$x_{\frac{1}{2}} = \ln 2/\mu \qquad [5]$$

Sklindant rentgeno spindulių pluoštui, kurio energijos spektras ištisinis (24.8a) pav.), medžiagoje stipriausiai sugeriami mažesnių energijų fotonai (24.9b) pav.). Toks pluoštas slopinamas staigiau nei pagal eksponentės dėsnį ([4] formulė). Kai mažų energijų fotonų lieka nedaug, pluoštą sudaro beveik vienodų energijų fotonai, kuriuos medžiaga gali sugerti (išsklaidyti) su vienoda tikimybe. Tokiam pluoštui pradeda galioti [4] formulė ir pluošto intensyvumas mažėja eksponentiškai.

Tuo būdu filtruojant rentgeno spindulius jie tampa kietesniais, t. y. skvarbesniais, o tai reiškia, kad μ vertė duotai medžiagai mažėja.

Vienas geriausiai žinomų eksponentinio kitimo pavyzdžių yra radioaktyvaus skilimo dėsnis: suskilusių atomų skaičius yra proporcingas tuo metu dar neskilusių radioaktyvių atomų skaičiui. Tas skaičius nuolat mažėja, todėl ir skilimų per tą patį laiką įvyksta vis mažiau.



24.9b) pav. **Rentgeno spindulių pluošto slopinimo (logaritminė skalė) priklausomybė nuo slopinančios medžiagos storio *x* (mm)**

■ Žr. 9 klausimą.

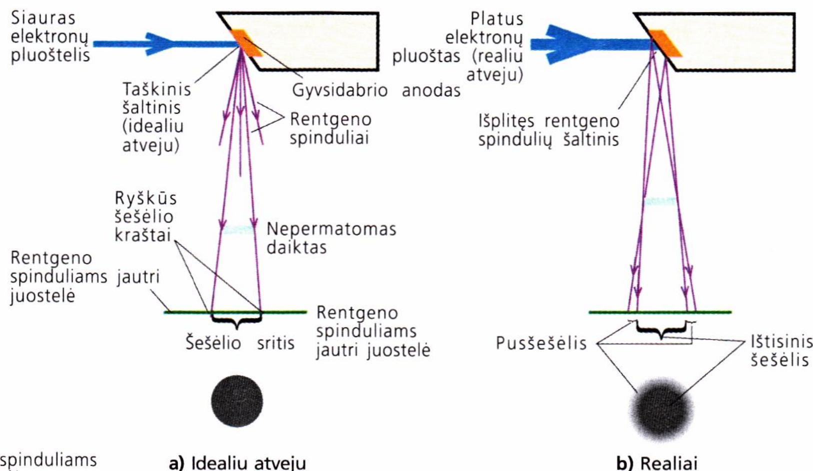
Atvirkštinio kvadrato dėsnis

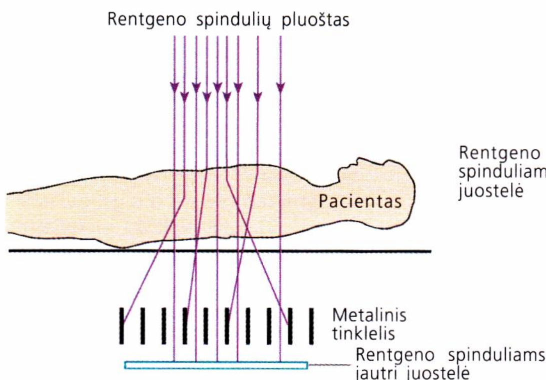
Kaip ir šviesa, rentgeno spinduliai iš šaltinio išsisklaido pagal atvirkštinio kvadrato dėsnį, t. y. jų intensyvumas mažėja proporcingai $1/r^2$, kur r yra atstumas nuo šaltinio. Dėl to spinduliai slopsta ir jų srautas mažėja.

Rentgeno atvaizdų kokybė

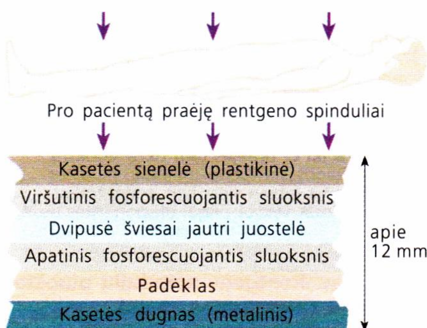
Rentgeno spindulių arba, kitais žodžiais tariant, jų šešėlio atvaizdas paprastai sudaromas specialioje fotografinėje plokštelėje. Atvaizdo ryškumas priklauso nuo *rentgeno spindulių šaltinio dydžio*, vadinamo **židinio dėme**, ir *sklaidos* fotonams praeinant pro tiriamą objektą.

24.10 pav. **Rentgeno atvaizdo kontrastingumą lemia šaltinio matmenys**

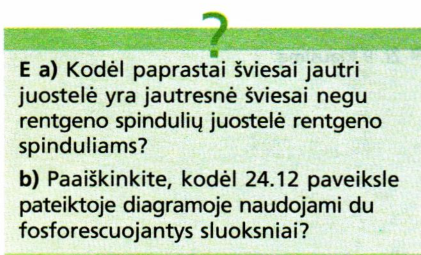




24.11 pav. **Metalinis tinklelis, naudojamas išsklaidytiems spinduliams sulaikyti. Dėl to pagerėja atvaizdo kontrastingumas. (Tinklelio tarpeliai padidinti.)**



24.12 pav. **Rentgeno aparato, kuriame naudojamas fosforescuojantis ekranas, schema**



E a) Kodėl paprastai šviesai jautri juostelė yra jautresnė šviesai negu rentgeno spindulių juostelė rentgeno spinduliams?

b) Paaiškinkite, kodėl 24.12 paveiksle pateiktoje diagramoje naudojami du fosforescuojantys sluoksniai?

Taškinis šaltinis meta ryškių kontūrų šešėlį (24.10a) pav.). Tačiau rentgeno spinduliai sklinda ne iš taškinio, o iš baigtinių matmenų anodo srities (24.10b) pav.), dėl to šešėliai esti nekontrastingi. Ryškumui pagerinti fotojuostelė dedama kaip galima arčiau objekto (paciento kūno dalies).

Atomų branduolių išsklaidyti fotonai neperduoda jokios naudingos informacijos ir patekę į fotojuostelę tiesiog iškraipo atvaizdą, sumažindami *kontrastingumą* tarp šviesių ir tamsių sričių. Išsklaidytų spindulių poveikis susilpninamas naudojant specialų filtruojantį tinklelį, kaip pavaizduota 24.11 paveiksle. Į šalis nukrypusius fotonus sugeria filtras, todėl juostelę pasiekia tik tiesia kryptimi sklindantys spinduliai.

Aiškesniam vaizdui gauti naudojami didesnių energijų (kietesni) rentgeno spinduliai bei ilgesnis apšvitos laikas. Tačiau tai pavojinga biologiniams audiniams, nes rentgeno spinduliai jonizuoja gyvųjų ląstelių atomus, dėl to didėja ir susirgimų piktybiniais augliais rizika.

Tobulesnėse registravimo sistemose galima gauti geresnės kokybės atvaizdus nedidinant rentgeno spindulių intensyvumo. Pavyzdžiui, prieš šviesai jautrią fotojuostelę įtaisytas fosforo junginiais padengtas ekranas sugeria rentgeno spindulius ir perspinduliuoja sugertą energiją regimojo diapazono šviesos kvantais. Fotojuostelė yra daug jautresnė šviesai, be to, vieno rentgeno fotono energijos pakanka daugybei regimojo diapazono fotonų sukurti. Dėl to rentgeno atvaizdams gauti gali būti naudojami labai mažo intensyvumo spinduliai.

Kai reikia gauti informaciją apie paciento virškinimo sistemą, jam duodama praryti nekenksmingo tirpalo iš bario sulfato miltelių. Ši medžiaga padidina vaizdo kontrastingumą, nes bario atomų eilės numeris Z didelis, todėl gerai sulaiko rentgeno spindulius. Panašiai į kraują suleidus nepavojingų dažų, kuriuose yra atomų su dideliais Z, galima tyrinėti kraujotakos sistemą (žr. šio skyriaus pradžioje esantį paveikslą).

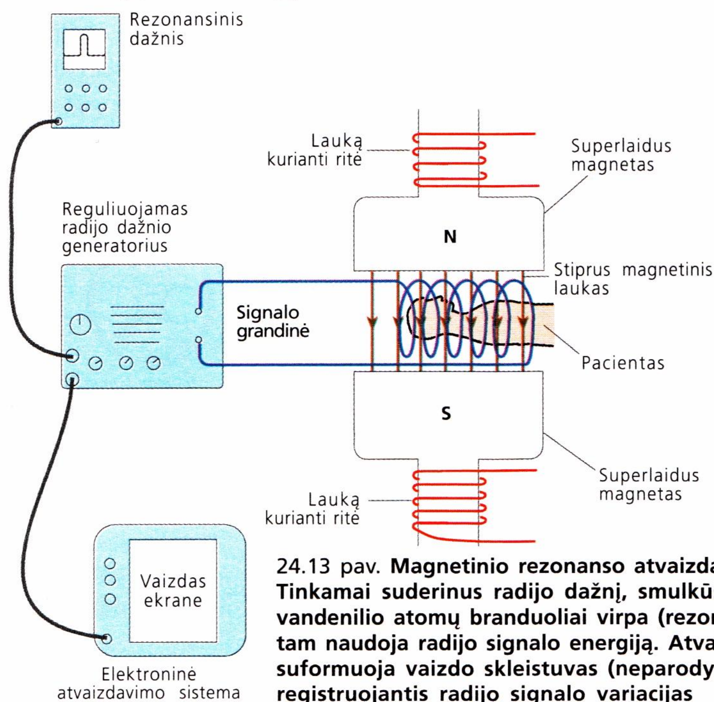
3 ATVAIZDŲ GAVIMAS BRANDUOLIŲ MAGNETINIU REZONANSU

Naudojantis šiuo metodu galima gauti giliai kūne esančių audinių atvaizdus. Metodas pagrįstas gana keista branduolių savybe – **branduolių magnetiniu rezonansu**. Vaizdų atkūrimo procesas dažniausiai vadinamas **magnetinio rezonanso atvaizdavimu (MRA)**. Šis metodas grindžiamas tuo, kad atomų branduoliai sukasi. Branduoliai turi krūvį, todėl

sukimasis tolygus apskritiminei srovei, o tokia srovė kuria magnetinį lauką. Prisiminkime, kad suartinus du magnetus, jie pasisuka pagal magnetinio lauko kryptį (panašiai, kaip kompaso rodyklė pasisuka lygiagrečiai Žemės magnetinio lauko linijoms). Dėl to vandenilio atomų branduoliai, kurių organiniame audinyje daugiausiai, stengiasi vienas kitą pasukti. Tačiau normalioje temperatūroje šiluminis judėjimas toks intensyvus, kad išblaškoma dauguma tam tikra kryptimi pasisukusių branduolių. Vandenilio branduoliai išsidėsto pagal magnetinio lauko linijas tik tada, kai jie atsiduria labai stipriame išoriniame magnetiniame lauke. Be to, vandenilio branduoliai gali pasisukti dviem būdais, kurių kiekvienas atitinka kvantuotos energijos būseną.

Dabar tarkime, kad branduoliai yra žemesnėje būsenoje; atitinkamai orientuoti jų magnetiniai laukai. Jei prijungsime silpną kintamąjį išorinį magnetinį lauką, vandenilio branduolys gali peršokti iš žemesnės būsenos į aukštesnę. Šiam šuoliui branduolys panaudoja išorinio lauko energiją, dėl to pasikeičia šio lauko stipris. Šis išorinio magnetinio lauko stiprio pokytis ir užregistruojamas MRA proceso metu.

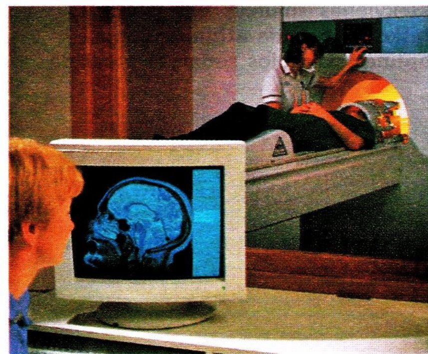
Tiriamuoju kūnu sklindantis kintamasis laukas yra elektromagnetinės aukšto dažnio radijo bangos magnetinė dedamoji, o signalo pakytis atitinka lauke esančių vandenilio atomų skaičių. Biologinių audinių molekulėse yra labai daug vandenilio branduolių. Jų skaičius kinta priklausomai nuo cheminių junginių koncentracijos, todėl skirtingi audiniai sugeria skirtingą lauko energijos kiekį.



24.13 pav. **Magnetinio rezonanso atvaizdas. Tinkamai suderinus radijo dažnį, smulkūs vandenilio atomų branduoliai virpa (rezonuoja) ir tam naudoja radijo signalo energiją. Atvaizdą suformuoja vaizdo skleistuvas (neparodytas), registruojantis radijo signalo variacijas**



24.14 pav. **Vienas moters galvos MR atvaizdų, rodantis smegenų, nugarkaulio, galvos kaulų ir veido audinių struktūrą**



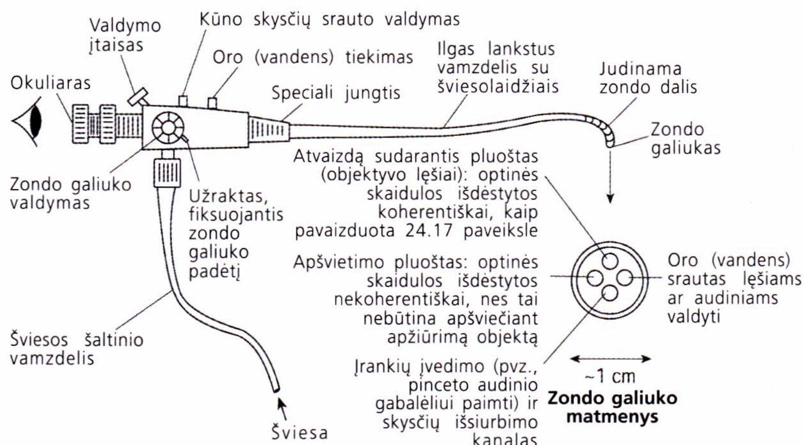
24.15 pav. **MR atvaizdų skleistuvas: pacientas guli MRA detektoriuje, o jo galvos MR atvaizdas matomas monitoriaus ekrane**

Signalas skleidžiamas erdviniu būdu, todėl jo kitimas atitinka tiriamojo audinio erdvinį atvaizdą, matomą ekrane (24.14 ir 15 pav.).

Magnetiniam rezonansui atvaizduoti reikalinga sudėtinga aparatūra, tačiau tai naudinga technologija, ypač kai reikia ištyrinėti sudėtingas struktūras, pavyzdžiui, smegenis. Metodas visiškai nepavojingas, nes radijo signalas labai silpnas, be to, tokiais dažniais nevirpa jokia kūne esanti molekulė, todėl radijo bangos nesugeriamos ir negali pakenkti pacientui. Žemesniojo dažnio bangos – mikrobangos – taip pat galėtų suteikti informaciją apie audinių sandarą, tačiau tik iškepusių audinių!

4 ATVAIZDŲ GAVIMAS ŠVIESA

Galima gauti ir tuščiavidurių organų atvaizdus: į juos šviesolaidžiu nukreipiama šviesa. Toks yra endoskopo veikimo principas (24.16 pav.).

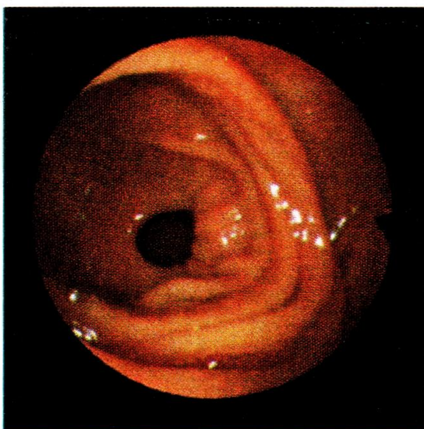


24.16 pav. **Pagrindinės endoskopo struktūrinės dalys**

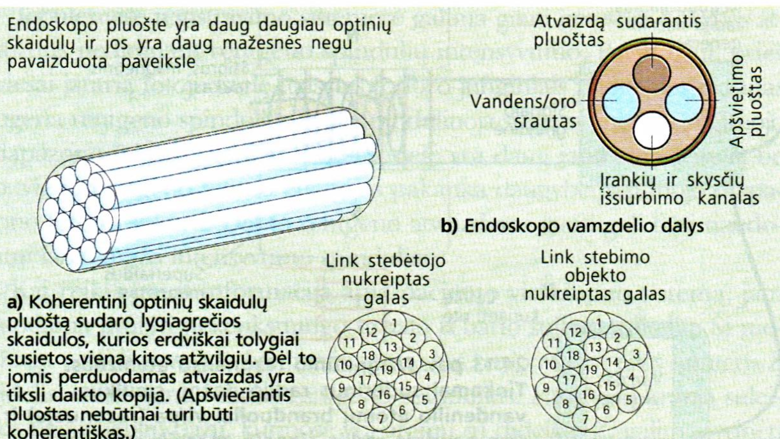
Plačiau apie šviesolaidžių optiką skaitykite 110 ir 146 p.

Endoskope yra du pluoštai labai plonų šviesolaidžių. Apšvietimo pluoštu sklinda šviesa, kuria apšviečiamas tyrinėjamas objektas, o atvaizdą sudarančiu pluoštu sklinda atsispindėjusi šviesa – atvaizdas. Atvaizdo sudarymo šviesolaidžiai išdėstyti koherentiškai (24.18 pav.), kad jų sudaryto atvaizdo mozaika kuo tiksliau atitiktų tyrinėjamą daiktą. Šis atvaizdas apžiūrinėjamas arba fotografuojamas per didinamąjį okuliarą.

Šviesolaidžių pluoštas yra lanksčiame zonde, kuris įleidžiamas į kūną, pavyzdžiui, per kurį nors virškinimo sistemos galą ar netgi kraujagyslę – tada galima apžiūrėti ir širdį. Zondu galima siųsti ir stiprų lazerio spindulį, kuris, sufokusuotas į nedidelę nesveiko audinio sritį, gali ją išdeginti.



24.17 pav. **Skrandyno išėjimo angos atvaizdas, gautas endoskopu. Kiekvienas smulkus vos įžiūrimas taškelis atvaizde atitinka vienos optinės skaidulos sudarytą atvaizdą**



24.18 pav. **Optinės skaidulos a) endoskopo vamzdelyje b)**

5 ATVAIZDŲ GAVIMAS RADIOAKTYVIŲJŲ ŽYMIŲ METODU

Radioaktyvūs nuklidai emituoja jonizuojančius spindulius. Jie gali būti užregistruoti įvairiais metodais, pavyzdžiui, jautria fotojuostele, Geigerio skaitikliu ar scintiliaciniu skaitikliu.

Medicininėje diagnostikoje radioaktyvūs nuklidai įleidžiami į organizmą, dažniausiai į kraują, o jų apytaka stebima kuriuo nors registravimo būdu. Kadangi cheminių elementų ir jų junginių judėjimą galima stebė-

Apie radioaktyvumą, pusėjimo trukmę, izotopus ir radiacijos registracijos metodus skaitykite 18 skyriuje.

ti sekant radioaktyvius jų izotopus, tai toks tyrimo būdas ir vadinamas **radioaktyviųjų žymių** metodu.

Panašiu būdu gali būti „paženklintos" tam tikros kūno sritys. Biocheminiuose procesuose dalyvaujančių radionuklidų cheminės savybės yra beveik identiškos to paties elemento neradioaktyviųjų izotopų savybėms, pavyzdžiui, radioaktyvioji anglis C14 elgiasi taip pat kaip ir neradioaktyvūs anglies izotopai C12 ir C13. Radioaktyviojo izotopo atomai, patekę į organizmą, dalyvauja tose pačiose biocheminėse reakcijose kaip ir stabilūs atomai, patenka į įvairius junginius arba gali būti pašalinti iš organizmo. Radioaktyvaus cheminio elemento kelias organizme gali būti sekamas ir sužinoma naudinga informacija apie kūne vykstančius procesus. Pavyzdžiui, jodo kaupimasis skydliaukėje buvo nustatytas naudojant radioaktyvųjį jodą.

■ Žr. 13 klausimą.

Dažniausiai medicininėje diagnostikoje naudojami radionuklidai pateikti 24.2 lentelėje.

24.2 lentelė. **Dažniausiai medicinoje naudojami radionuklidai**

Organas, audinys	Radionuklidas	Panaudojimas
Bendroji kūno struktūra	^{3}H, ^{24}Na, ^{42}K, ^{82}Br	Naudojami kūne esančių skysčių tūriams nustatyti bei druskų (pavyzdžiui, natrio, kalio, chloro) kiekiams įvertinti
Kraujas	^{32}P, ^{51}Cr, ^{125}I, $1^{131}I$, ^{132}I	Naudojami kraujo bei jį sudarančių komponentų (plazmos, raudonųjų kraujo kūnelių) tūriams išmatuoti ir kraujo tūriui įvairiuose organuose nustatyti. Taip lokalizuojamos vidinio kraujavimo vietos.
Kaulai	^{45}Ca, ^{47}Ca, ^{85}Sr, ^{99m}Tc (žr. 216 puslapyje)	Naudojami kalcio sugerčiai įvertinti, kaulų ligoms nustatyti, įvairių mineralų metabolizmo (apykaitos) kauluose tyrimams
Piktybiniai augliai	^{32}P, ^{60}Co, ^{99m}Tc, ^{131}I	Naudojami augliams aptikti ir diagnozuoti; ^{60}Co naudojamas gydymui
Širdis ir plaučiai	^{99m}Tc, ^{131}I, ^{133}Xe	Naudojami širdies veiklos tyrimams: kraujo tekėjimo, tūrio ir cirkuliacijos nustatymui. Radioaktyviais izotopais pažymėtos dujos naudojamos plaučių kvėpavimo funkcijai tirti
Kepenys	^{32}P, ^{99m}Tc, ^{131}I, ^{198}Au	Naudojami kepenų ligų diagnostikai ir virškinamojo trakto sutrikimams nustatyti
Raumenys	^{201}Tl	Naudojami raumenų diagnostikai, ypač širdies raumens veiklos tyrimams
Terapija	^{32}P, ^{131}I	^{131}I naudojamas skydliaukės augliams gydyti, ^{32}P naudojamas kraujo vėžiui gydyti
Skydliaukė	^{99m}Tc, ^{123}I, ^{125}I, ^{131}I, ^{132}I	Naudojami skydliaukės funkcijai tirti, ^{132}I ypač naudingas nėščiųjų ir vaikų tyrimams

Radioaktyviųjų nuklidų koncentracija turi būti kaip galima mažesnė, kad būtų kiek galima sumažintas žalingas jonizuojančiosios spinduliuotės poveikis. Apšvitos laikas sumažėja, kai pažymėtoji medžiaga greitai pasišalina iš organizmo arba kai nuklido gyvavimo trukmė yra maža.

Nuklido gyvavimo trukmė turi būti parinkta taip, kad atitiktų tyrinėjamo proceso specifines trukmes. Dažnai yra naudingi mažos gyvavimo trukmės radionuklidai. Pavyzdžiui, kraujo cirkuliacija gali būti ištirta per labai trumpą laiką. Turi būti naudojami radionuklidai, kurių skleidžiamą spinduliuotę lengva užregistruoti, be to, jų kaupimosi vietos turi būti gerai žinomos.

Aukščiau aprašytus reikalavimus geriausiai atitinka gama (γ) spinduliai, kadangi g spinduliai lengvai prasiskverbia pro kūno audinius ir jonizuoja palyginti nedaug atomų. Kai kada labai sėkmingai panaudojami ir beta (β) spinduliai. 24.2 lentelėje pateikti radioizotopai yra β arba γ dalelių spinduoliai.

Alfa (α) dalelės labai stipriai jonizuoja aplinką, taigi a spinduoliai yra labai žalingi ir medicininėje diagnostikoje nenaudojami.

?

F Kodėl α dalelių spinduolius sudėtinga panaudoti biologinių audinių atvaizdams sudaryti?

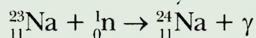
Technecis99m

Vienas labiausiai naudojamų radioizotopų yra dirbtinis elementas **technecis** $^{99m}_{43}Tc$. Raidė „m“ reiškia, kad tai yra metastabilus nuklidas, kurio branduolys yra sužadintas, t.y. jo energija didesnė negu stabilaus technecio. Tokie branduoliai pereina į normalią būseną išspinduliuodami 140 keV energijos gama spindulius, kuriuos aptikti palyginti paprasta. Perėjimas nusakomas pusėjimo trukme, lygia 6 valandoms. Radioaktyviojo virsmo metu šis izotopas virsta paprastu technečiu99. Tai įprastas, gamtoje randamas radionuklidas, kurio skilimo pusėjimo trukmė 216 000 metų, t.y. palyginti stabilus, nedidelę apšvitą sukeliantis izotopas.

Dirbtinių izotopų kūrimas

Dauguma medicinoje naudojamų radioaktyviųjų medžiagų neatsiranda natūraliai gamtoje, o yra gaminamos branduoliniuose reaktoriuose arba branduolinių tyrimų laboratorijose iš gamtinių, dažniausiai stabilių, izotopų. Paprastai gamtinio izotopo pavyzdys apšvitinamas neutronais, kurie gaunami branduoliniuose reaktoriuose (plačiau apie branduolinius reaktorius skaitykite 56 p.).

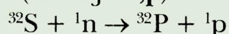
Apšvitinto elemento branduolys pagauna neutroną, susižadina, todėl akimirksniu išspinduliuoja γ pluoštą ir tampa radioaktyviuoju natūralaus nuklido izotopu. Sutrumpintai ši reakcija užrašoma (ν,γ). Pavyzdžiui, natris-23 paverčiamas radioaktyviu natriu-24:



$$^{23}_{11}Na + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{24}_{11}Na + \gamma$$

Šio proceso metu cheminis elementas išlieka tas pats. Tačiau apšvitinus medžiagą neutronais, ne visi branduoliai pakeičiami. Chemiškai yra neįmanoma atskirti du skirtingos masės izotopus, todėl gauti gryną iš radioaktyvių branduolių sudarytą medžiagą yra neįmanoma. Sakoma, kad paprastasis natris yra radioaktyviojo natrio šaltinis. Fosforas-32 ir kalis-42 taip pat nesudėtingai gaunami neutroninio švitinimo būdu.

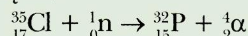
Grynas radioaktyvus fosforas-32 gali būti gautas kitu būdu: paprastą sierą apšvitinus neutronais, naujasis branduolys išspinduliuoja protoną ir virsta fosforo-32 branduoliu (reakcija **n,p**):



$$^{32}S + ^{1}n \rightarrow ^{32}P + ^{1}p$$

Susidaręs nuklidas yra kitas cheminis elementas, pasižymintis kitokiomis cheminėmis savybėmis, todėl jį galima iš mišinio išskirti. Šiuo metodu gaunamos grynos radioaktyvios medžiagos, sudarytos vien tik iš radioaktyviųjų atomų. Panašių reakcijų metu gaminami anglies-14 izotopai iš azoto-14, siera-35 iš chloro-35.

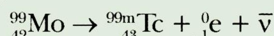
Sukėlus branduolinę reakciją (**n,**α) taip pat galima gauti švarius radioaktyvių medžiagų pavyzdžius. Pavyzdžiui, fosforą-32:



$$^{35}_{17}Cl + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{32}_{15}P + ^{4}_{2}\alpha$$

Sekančiame etape fosforas chemiškai atskiriamas nuo chloro. Ši reakcija dažnai naudojama gauti vandeniliui-3 (tričiui) iš ličio-6.

Labai naudingas izotopas metastabilus technecis-99 gaunamas iš molibdeno, kai šis skyla išspinduliuodamas elektroną:



$$^{99}_{42}Mo \rightarrow ^{99m}_{43}Tc + ^{0}_{-1}e + \bar{\nu}$$

Tokio tipo reakcijos vyksta tuomet, kai pačiame branduolyje neutronas skyla į protoną ir elektroną ir reakcijos metu dar išspinduliuojamas antineutrinas: $n \rightarrow p + e^{-} + \bar{\nu}$.

Molibdeno-99 skilimo pusėjimo trukmė yra 67 valandos, todėl technecio preparatai paruošiami naudojant molibdeno ruošinius – aliuminio cilindrus su adsorbuotais molibdeno atomais. Kai prireikia, cilindre išsiskyręs technecis išplaunamas su druskos tirpalu, o netirpus molibdenas lieka cilindre. Belieka išplautą tirpalą išvalyti nuo aliuminio ir kitokių priemaišų.



24.19 pav. **Technecio-99m šaltinių, naudojamų medicinoje γ spindulių scintigramų gavimui, gamybos linija**

B DALIS: FIZIKA IR LIGŲ GYDYMAS

Daugelis diagnostinių procesų gali būti panaudoti gydymui, arba, kalbant medicininiais terminais, **terapijai**.

1 ULTRAGARSINĖ TERAPIJA

Ultragarsas naudojamas nedideliam biologinio audinio tūriui įkaitinti ir mažų auglių ar išsigimusių (vėžinių) ląstelių židiniui sunaikinti. Tam reikia didesnio intensyvumo ultragarso bangų negu naudojama diagnostikoje. Kad nebūtų pažeisti aplink taikinį esantys audiniai, platus ultragarso spindulių pluoštas tiksliai sufokusuojamas arba naudojami keli silpnesni pluošteliai, kurie susikerta taikinyje.

Kai ultragarso dažnis atitinka savąjį sistemos virpesių dažnį, gali būti suskaldyti net ir tuščiaviduriai akmenys. Mes jau aptarėme **kavitaciją**, kurios metu maži oro burbuliukai sugeria ultragarso energiją, dėl to smarkiai išsiplečia ir gali pažeisti vidinius audinius. Tačiau atsargiai naudojant kavitaciją galima panaudoti žaizdoms ar kaulų lūžiams gydyti.

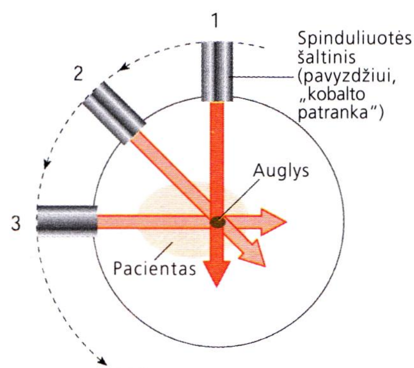
Plačiau apie jonizuojančiosios spinduliuotės žalingą poveikį sveikatai skaitykite 72 puslapyje.

2 JONIZUOJANČIOSIOS SPINDULIUOTĖS TERAPIJA

Jonizuojančioji spinduliuotė gali užmušti gyvas ląsteles, todėl ir **rentgeno spinduliai**, ir radionuklidų skleidžiami spinduliai naudojami **radioterapijoje** piktybiniams augliams gydyti.

Norint pasiekti auglius, esančius giliai kūne, reikia naudoti didesnės energijos rentgeno spindulius. Mažesnės energijos kvantai lengvai sugeriami minkštuosiuose audiniuose (žr. 24.2 lentelę) dar nepasiekus būtino gylio žmogaus kūne ir gali pažeisti tuos audinius, kuriuose susigeria.

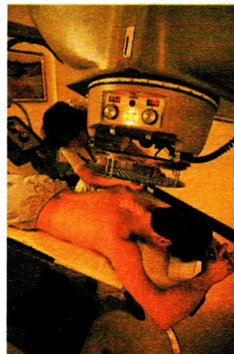
Didelės energijos rentgeno spinduliai gaunami padidinus įtampą rentgeno vamzdyje, kartais net iki 2 MV (palyginkite su 120 kV, tipine elektronus greitinančia įtampa, naudojama rentgenodiagnostikoje). Iš rentgeno aparato sklindančių spindulių spektrą sudaro įvairių energijų fotonai. Mažos energijos fotonai nufiltruojami (aliuminio, alavo, švino ir aukso filtrais). Rentgeno spinduliai nukreipiami link piktybinių ląstelių keliais pluošteliais (24.20a) pav.). Tokiu būdu susilpninamas žalingas jonizuojantysis šių spindulių poveikis kitiems spindulių sklidimo kelyje esantiems audiniams. Panašus efektas pasiekiamas ir naudojant vieną rentgeno pluoštą – tik tada pacientas sukamas apie sufokusuoto pluošto tašką.



24.20a) pav. **Spindulinė terapija naudojant keleto pluoštelių technologiją. Nedidele doze apšvitinami visi į pluošto aplinką patekę audiniai (šaltinio padėtys 1, 2, 3 ir t. t.). Tik piktybinis auglys švitinamas visą laiką. Toks pats efektas pasiekiamas sukant pacientą aplink suformuoto pluošto tašką**

Kai kuriais atvejais terapijai reikia dar didesnių energijų fotonų. Labai didelių energijų fotonai persikloja su γ spindulių sritimi, todėl tokius rentgeno spindulius galima vadinti *dirbtiniais* γ spinduliais. Jiems generuoti naudojami **superaukštos įtampos įrenginiai** – tiesiniai arba žiediniai elektronų greitintuvai (aprašyti 26 skyriuje). Šiais įrenginiais galima įgreitinti elektronus nuo 4 MV iki 42 MV įtampa. Tokie elektronai generuoja labai didelės energijos fotonus.

Teleterapijai naudojami didelės energijos γ kvantai, kuriuos spinduliuoja radioaktyvieji branduoliai. („Tele" reiškia „nuotolinis".) Labiausiai paplitę radionuklidai yra cezis-137 ir kobaltas-60 (24.20b) pav.). Jie visą laiką spinduliuoja maždaug vienodu intensyvumu. Papratai γ spinduolis dedamas į pailgą konteinerį iš švino ir plieno su nedidele anga, iš kurios išeina siauras γ spindulių pluoštelis. Tokio šaltinio privalumas yra daug mažesni matmenys palyginti su rentgeno aparatu, todėl jį daug patogiau naudoti. Didžiausias γ spindulių šaltinių trūkumas yra tas, kad jų neįmanoma išjungti. Tai pavojinga sveikatai, nes net ir su labai silpnais šaltiniais dirbantys asmenys yra nuolatos švitinami.



24.20b) pav. **„Kobalto patranka" naudojama teleterapijoje. Kobaltas60 spinduliuoja 1 MeV energijos gama kvantus (įprastinės terapijoje naudojamų rentgeno spindulių energijos 8–10 MeV), kuriais dažnai gydomi antriniai augliai**

JONIZUOJANČIOSIOS SPINDULIUOTĖS DETEKTORIAI MEDICINOJE

SVARBIAUSI JONIZUOJANČIOSIOS spinduliuotės registravimo metodai yra aprašyti 18 skyriuje. Daugelis jų buvo pritaikyti medicininei diagnostikai ir radioterapijai.

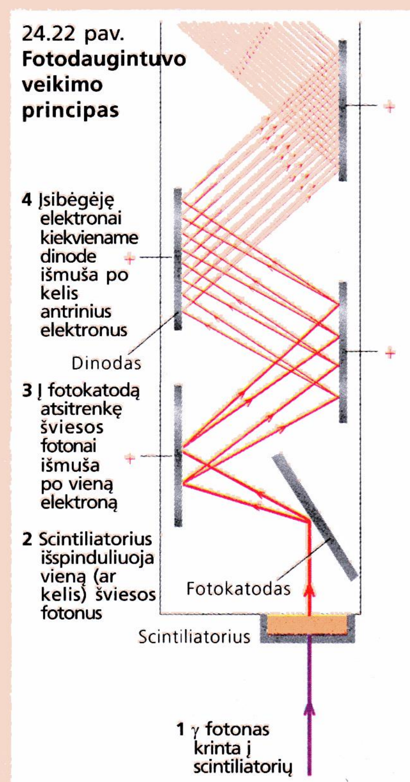
Geigerio skaitiklis naudojamas β spinduliuotei, kurią skleidžia radionuklidais užterštos medžiagos ar atliekos, aptikti. Paprastai tokio skaitiklio maitinimo šaltinis yra baterija, todėl jį patogu nešioti. Jo schemoje gali būti įrengtas garsinis signalas, kuris įsijungia tada, kai teršalų koncentracija viršija leistinąją normą. Miniatiūriniai Geigerio skaitikliai yra tokie maži (2 mm storio 20 mm pločio kvadratėlis), jog juos galima įterpti ir į kūną.

Jonizacijos kamera kartais naudojama apšvitos jonizuojančiąja spinduliuote dozėms matuoti. Tokioje kameroje matuojama nedidelė srovė arba sukauptas krūvis, kuris atsiranda, kai kameroje esančios dujos jonizuojamos.

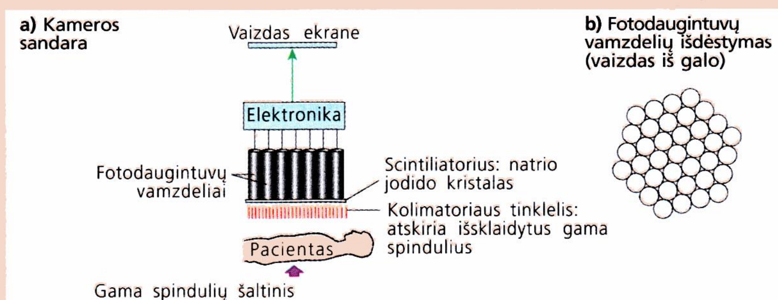
γ spinduliuotė plačiai naudojama medicininėje diagnostikoje, nes silpnai jonizuoja audinius. Tačiau dėl tos pačios priežasties γ spindulių neįstengia užregistruoti nei Geigerio skaitikliai, nei jonizacijos kameros. Dėl to yra sukurti kiti γ spindulių detekcijos metodai, pavyzdžiui, **scintiliacinis skaitiklis**. Pagrindinės jo dalys pateiktos 24.21 paveiksle. Tokiu skaitikliu galima suskaičiuoti γ fotonų skaičių, tačiau sudėtinga nustatyti, iš kurios vietos jie išspinduliuojami, kas ypač svarbu medicinoje. Dėl to buvo sukurtas sudėtingesnis scintiliacinio skaitiklio variantas, vadinamas **gama kamera** (24.22 pav.). Panagrinėkime, kaip veikia šis prietaisas.

Kai γ kvantas (kurį išspinduliuoja, pavyzdžiui, paciento praryta medžiaga) patenka į jonizuotą medžiagą, pavyzdžiui, natrio jodidą, jis sukelia šviesos blyksnį (24.21 pav.): sakoma, kad medžiaga *scintiliuoja*. Gama kamera gautas atvaizdas vadinamas **scintigrama**. Išspinduliuotų šviesos kvantų skaičius priklauso nuo γ kvanto energijos. Dalis šviesos kvantų pasiekia fotokatodą, iš kurio kiekvienas kvantas išmuša po elektroną; šis procesas vadinamas *fotoefektu*. Išmuštų elektronų skaičius yra per mažas, kad būtų galima signalą užregistruoti kokiu nors elektriniu prietaisu. Jų skaičiui padidinti naudojama keletas stiprinimo pakopų. Pakopą sudaro tam tikra metalinė plokštelė, vadinama **dinodu**; prie kiekvieno dinodo prijungiama vis didesnė įtampa. Iš fotokatodo išmušti elektronai tos įtampos veikiami įsibėgėja ir, susidūrę su pirmąja plokštele, išmuša po keletą elektronų. Antriniai elektronai skrieja link antrojo dinodo, prie kurio prijungta didesnė įtampa, ir susidūrę išmuša dar daugiau elektronų. Jei susidūrimo metu vienas elektronas įstengia išmušti vidutiniškai po 4 antrinius elektronus, tai pirminio elektrono, praėjusio dešimties pakopų dinodinę sistemą, sukurtoji elektros srovė sustipréja 4^{10} kartų, t. y. maždaug 10^6. Aprašytoji dinodinė sistema vadinama **fotodaugintuvu**.

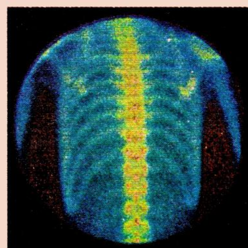
Gama kamerą sudaro daug siaurų greta sudėtų fotodaugintuvų, (24.22a) pav.). Fotodaugintuvų sustiprintas signalas perduodamas į įrašymo įrenginį ar vaizdo monitorių. Sudarytas atvaizdas rodo radioaktyviųjų elementų pasiskirstymą paciento kūne (24.22b) ir c) pav.).



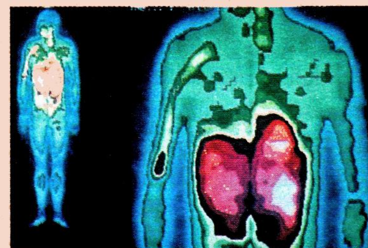
24.22 pav. Fotodaugintuvo veikimo principas



24.22a) Gama spindulių scintiliacinė kamera



24.22b) Sveiko žmogaus krūtinės scintigrama. Joje matyti, kad radioaktyvioji žymė technecis99m susikoncentravęs kauluose. Kaulai, pažeisti piktybinio auglio, matytųsi atvaizde kaip „karštos dėmės"



24.22c) pav. Sveiko žmogaus scintigrama. Radioaktyvioji žymė talis201 susikaupė kepenyse ir skrandyje

Žr. 12 klausimą.

?

G paaiškinkite, kodėl alfa dalelės, naudojamos implantuojamojoje terapijoje, sukelia tik vietinius reiškinius.

Piktybiniams augliams šalinti gali būti naudojamai ir **implantuojami** radioaktyviosios spinduliuotės šaltiniai. Implantai (pavyzdžiui, radis226 ar auksas198) dažniausiai įtaisomi ant adatos galiuko ir įbedami į kūną ties auglio vieta (24.23 pav.). Implantuoti radionuklidai skleidžia silpną, bet nuolatinę spinduliuotę, kuri žudo ląsteles. Nedidelio aktyvumo šaltiniai sukelia tik vietinį poveikį. Tai ypač svarbu radžio226 implantams, nes šis elementas spinduliuoja didelės jonizacinės galios α daleles.

Kai kurie elementai ar jų junginiai gali kauptis tam tikruose organuose ar ląstelėse. Tuomet prarytos ar kokiais kitais būdais į organizmą įterptos medžiagos, prisotintos radioaktyviųjų elementų, susikaupia piktybiniame auglyje ir jį švitina. Pavyzdžiui, radioaktyvaus jodo kaupimasis skydliaukėje panaudojamas skydliaukės vėžiui gydyti. Koloidiniai aukso198 junginiai veikia piktybines ląsteles, esančias plaučius dengiančio apvalkalo skysčiuose ir pilvo ertmėse.

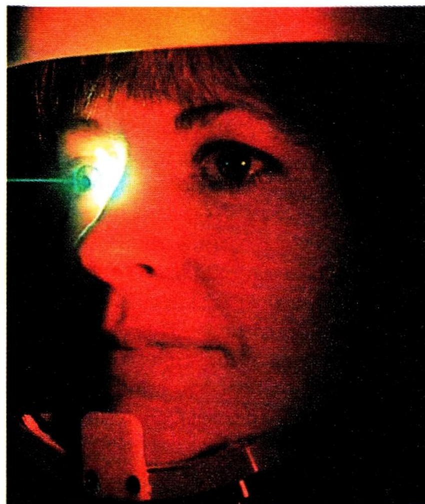


24.23 pav. **Radioaktyviuoju iridžiu padengtos implantavimo adatos naudojamos limfmazgių vėžiui gydyti. Gydymas gali trukti nuo 24 valandų iki vienos savaitės**

3 LAZERINĖ TERAPIJA

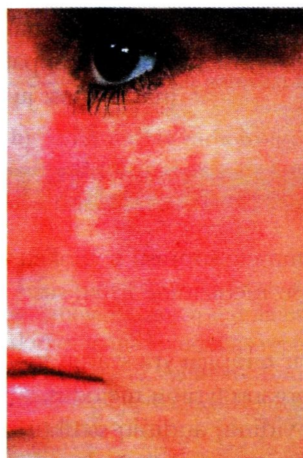
Piktybiniai audiniai (pavyzdžiui, vėžys) sugeria lazerio spinduliuotę daug stipriau negu sveiki audiniai. Lazerio spinduliuotė dažniausiai skleidžiama impulsais, kuriuose sukauptas tam tikras energijos kiekis. Spinduliuotės bangos ilgis, jos intensyvumas, impulso trukmė ir švitinimo laikas parenkami tokie, kad atitiktų auglio sugerties savybes.

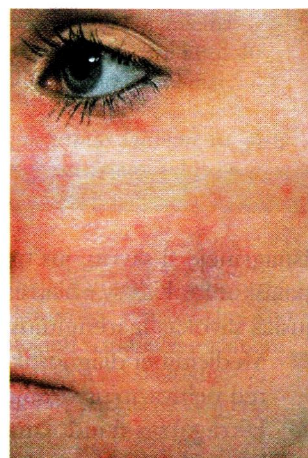
Tamsios pigmentacijos augliai labiausiai sugeria ir todėl lengvai sunaikinami. Kaip tik dėl to lazeriai naudojami ir odos dėmėms, pavyzdžiui, pigmentinėms „balinti“ (24.24a) ir b) pav.). Lazerio pluošteliu nesunkiai keliais mažais (sufokusuotais) taškais prie akies dugno gali būti „privirinta“ atšokusi tinklainė (24.24c) pav.).



24.24c) pav. **Lazerinė akies operacija**

Lazeriai gali spinduliuoti šviesą, kurios galios pakanka audiniams perpjauti. Vienas didžiausių tokio pjaustymo privalumų yra tai, kad lazerio spindulys iš karto pridegina nupjautas kraujagysles, todėl pacientas daug mažiau kraujuoja. Naudojant lazerinę techniką, palyginti saugiai gali būti pašalintos net ir ligos pažeistos kepenų sritys, tuo tarpu paprastu skalpeliu galima sukelti gyvybei pavojingą nukraujavimą.





24.24a) ir b) pav. **Pigmentinių dėmių šalinimas lazeriu: kairėje vaizdas iki operacijos, dešinėje – po operacijos**

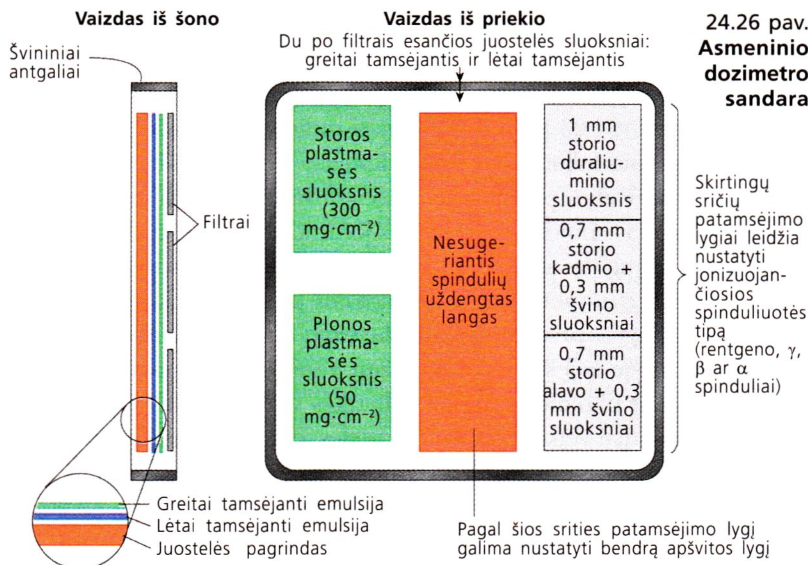
4 SVEIKATOS DARBUOTOJŲ APŠVITOS STEBĖJIMAS

Medicinos darbuotojai ir pacientai turi būti visomis įmanomomis priemonėmis apsaugoti nuo pavojingos jonizuojančiosios spinduliuotės. Tam taikomos įvairios **apšvitos** stebėjimo priemonės. Labiausiai paplitę stebėjimo įrenginiai yra **asmeniniai dozimetrai** (24.25 pav. ir 24.26 pav.).

Dozimetrą sudaro dvi juostelės: viena labai jautri, o kita nejautri. Juostelės sudėtos į nuo šviesos apsaugotą kasetę, o jonizuojančioji spinduliuotė į ją gali patekti pro tris langelius. Vienas jų yra „atidarytas“: nuo šviesos saugantis dangtelis nesugeria jonizuojančiųjų spindulių. Kiti du langeliai padengti keliais spindulius sugeriančiais filtrais ir atlieka dvi funkcijas: rodo bendrą apšvitos *lygį* ir nustato apšvitos *tipą*:



24.25 pav. **Medicinos darbuotojų nešiojamos dozimetrinės kasetės, pagal kurias stebima apšvitos dozė**



24.26 pav. **Asmeninio dozimetro sandara**

- Vis daugiau apšvitinama juostelė tamsėja, o matomo vaizdo šviesumas priklauso nuo bendro apšvitos lygio.
- Mažos energijos spinduliuotė tamsina tik tą juostelės sritį, kuri nepadengta jokiu filtru, ir neprasiskverbia į filtrais uždengtas juostelės sritis. Kuo didesnė jonizuojančiųjų fotonų ar dalelių energija, tuo didesnė tikimybė, kad jos prasiskverbs pro filtrus ir padidins po jais esančios juostelės apšviestumą. Juosteles skiria gerai nuo jonizuojančios spinduliuotės apsaugotos sritys, todėl pagal juostelių kontrastą galima spręsti ir apie žmogaus gautą radiacijos dozę, ir apie jonizuojančių spindulių energiją.

Filtrai ir juostelės tamsėjimo greičiai parenkami taip, kad apšvitos tipo ir lygio analizė būtų kuo paprastesnė. Dozimetrinės kasetės yra palyginti pigios, patikimos ir, kaip stebėjimui naudojami prietaisai, pakankamai tikslios: jų matavimo tikslumas apie 20%.

SANTRAUKA

Išnagrinėję šį skyrių, jūs turėtumėte suprasti ir mokėti paaiškinti tokias svarbiausias su medicinine fizika susijusias sąvokas ir įrenginius:

- Medicininei diagnostikai ir terapijai yra svarbu turėti neinvazinius vidinių organų tyrimų metodus.
- Ultragarsas naudojamas vidinių audinių struktūroms išryškinti, ypač sėkmingai taikomas kraujo srautams matuoti.
- Ultragarsą generuoja ir registruoja pjezoelektriniai kristalai. Gaunamų atvaizdų skyra (įžiūrimų detalių matmenys) priklauso nuo ultragarso bangų dažnio.
- Gali būti generuojami skirtingų rūšių rentgeno spinduliai, o juos registruojant gaunami atvaizdai.
- Rentgeno spinduliai sąveikauja su medžiaga: sąveikos metu jie filtruojami, jų intensyvumas silpnėja ($I = I_0 e^{-\mu x}$), o dėl skirtingo biologinių audinių slopinimo galima gauti atvaizdus pagal jų metamus šešėlius.
- Rentgeno spinduliai generuojami stabdant didelės įtampos įgreitintus elektronus. Rentgeno spinduliai pacientą pasiekia keliais pluoštais, o švitinant vienu pluoštu pacientas sukamas.
- Magnetinio rezonanso atvaizdavimas yra nepavojingas vidinių organų audinių atvaizdavimo metodas.
- Praryti radioizotopai naudojami diagnostikai ir terapijai.
- Medicinoje naudojami radioizotopai (pavyzdžiui, technecis99m) dažniausiai gaminami iš neradioaktyvių gamtinių izotopų.
- Jonizuojančiajai spinduliuotei aptikti, kontroliuoti bei atvaizduoti naudojami tokie prietaisai ir įrenginiai: šviesai jautri juostelė, Geigerio ir scintiliacinis skaitikliai, gama kameros.
- Naudojant ultragarsą ir jonizuojančiąją spinduliuotę, būtina rūpintis darbuotojų ir pacientų saugumu.

KLAUSIMAI

Duomenys:
Šviesos greitis $c = 3 \times 10^8$ m·s^{-1}
Planko konstanta $h = 6{,}6 \times 10^{-34}$ J·s
Elektrono krūvis $e = 1{,}6 \times 10^{-19}$ C

1 Kodėl ultragarsinė diagnostika yra *neinvazinis* metodas?

2 Nurodykite keletą ultragarsinės technikos privalumų palyginti su rentgenodiagnostikos sistemomis.

3 4 MHz dažnio ultragarso pluoštas minkštuoju audiniu sklinda 1500 m·s^{-1} greičiu. Pagal išmatuotą atspindį nuo vidinio judančio organo paviršiaus nustatytas 400 Hz Doplerio poslinkis. Kokiu greičiu juda tas paviršius?

4 Nuo ko priklauso ultragarsu gautų atvaizdų skyra? Kokio mažiausio dydžio objektus galima išskirti atvaizde, kuris gaunamas naudojant 10 MHz dažnio ultragarso bangas?

5
a) Pavaizduokite rentgeno vamzdžio generuojamų fotonų pasiskirstymą pagal energiją. Pažymėkite svarbiausias spektro ypatybes. Kas lemia didžiausią fotono energiją?
b) Grafiškai atvaizduokite, kaip keičiasi fotonų pasiskirstymas, kai:
 (i) didinama rentgeno vamzdžio įtampa;
 (ii) padidėja rentgeno vamzdžiu tekanti srovė;
 (iii) anodas padarytas iš medžiagos, kurio Z didesnis.

6 Apskaičiuokite mažiausią rentgeno spindulių bangos ilgį, jei elektronus greitinanti įtampa lygi 150 kV.

7 Kai kuriuose rentgeno vamzdžiuose anodas sukamas. Paaiškinkite, kodėl.

8 Radiografijoje naudojami rentgeno spinduliai pirmiausia filtruojami, dažniausiai nestora aliuminio plokšte.
a) Nurodykite du rentgeno pluošto pakitimus, kuriuos sukelia filtras.
b) Kam medicinoje filtruojami rentgeno spinduliai?

9 Rentgeno spindulių slopinimo tam tikroje medžiagoje masės koeficientą μ_m su linijiniu slopinimo koeficientu μ sieja sąryšis:

$$\mu_m = \mu/\rho,$$

kur ρ yra medžiagos tankis (žr. 210 p.). Aliuminio masės slopinimo koeficientas lygus 0,012 m^2·kg^{-1}, o jo tankis 2700 kg·m^{-3}.
a) Apskaičiuokite linijinį aliuminio slopinimo koeficientą.
b) Apskaičiuokite aliuminio skydo storį, kuriam esant statmenai krintančio rentgeno spindulių intensyvumas sumažėtų iki 10% pradinės vertės.

10
a) Koks yra radioaktyviųjų žymių metodo panaudojimo medicininėje diagnostikoje principas? Kokiomis savybėmis turi pasižymėti izotopas, kad gerai atliktų radioaktyvios žymės funkciją?
b) Nurodykite **du** radioizotopus, kurie dažniausiai naudojami organų ar kūno dalių tyrimams kaip radioaktyvios žymės. *Kiekvienam* iš izotopų:
 (i) nurodykite apytikslę skilimo pusėjimo trukmę, jų spinduliuojamų spindulių tipus ir tų spindulių aptikimo bei stebėjimo metodus.
 (ii) papasakokite bent vieną konkretų šių izotopų panaudojimo metodą.

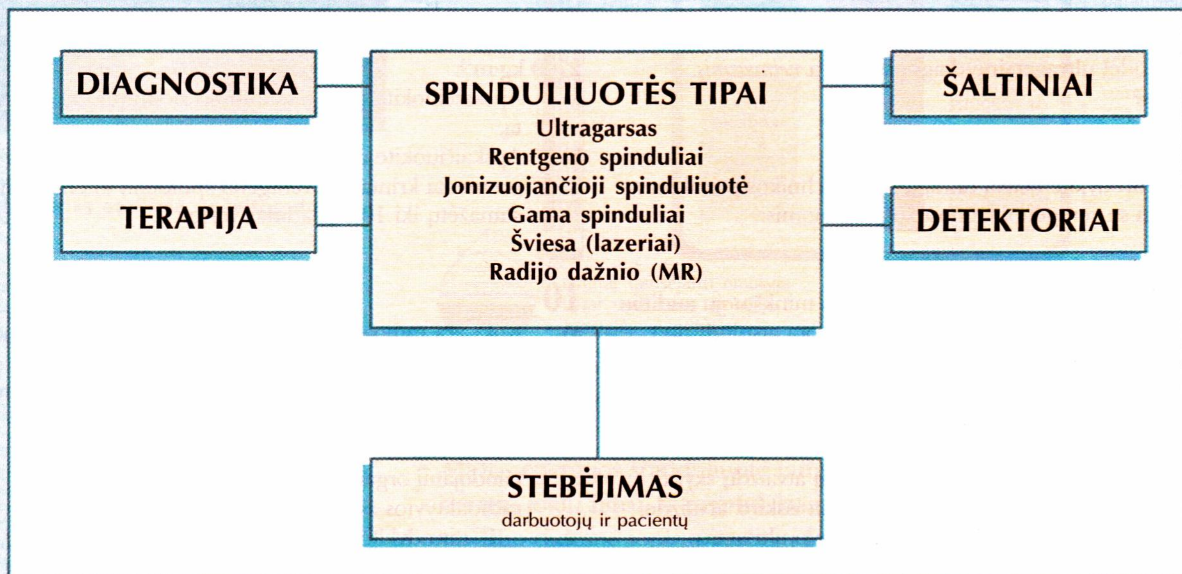
11
a) Aprašykite du būdus medicinoje naudojamiems radioaktyviems izotopams pagaminti. Kokiu tikslu radioizotopų gamybai naudojami branduoliniai reaktoriai?
b) Ką reiškia radioizotopas, *neturintis šaltinio*? Ar jūsų **a)** dalyje aprašytais metodais gaminami tokie radioizotopai?

12 Standartinis Geigerio skaitiklis gali būti naudojamas jonizuojančiosios spinduliuotės kontrolei. Paaiškinkite, kuo skiriasi gama spindulius registruojanti scintiliacinė kamera nuo Geigerio skaitiklio. Kuo scintiliaciniai skaitikliai medicininėje diagnostikoje geresni už paprastus Geigerio skaitiklius?

13 Radioizotopas ^{132}I yra γ spinduolis ir gali būti naudojamas kaip radioaktyvioji žymė žmogaus kūne. Paruošiami du vienodi ^{132}I pavyzdžiai skydliaukės testui. Paaiškinkite, kaip jie naudojami skydliaukės funkcijų tyrimui.

MEDICININĖ FIZIKA

Kai kurie medicininėje diagnostikoje ir terapijoje naudojami moderniosios fizikos metodai ir įrenginiai pateikti šio skyriaus schemoje. Pasitikrinkite, ar gerai žinote pagal mokymosi programą privalomus dalykus.



FIZIKOS PRIEŠAKINIS FRONTAS



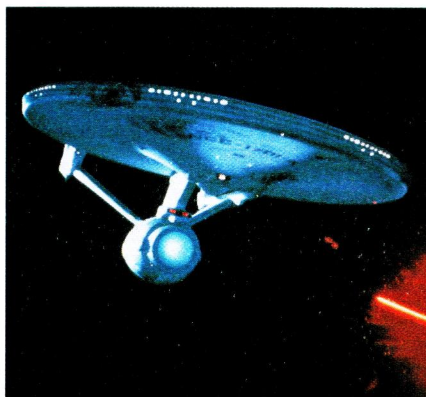
Dvidešimtasis amžius iš esmės pakeitė ne tik mūsų kasdieninį gyvenimą, bet ir Visatos supratimą. Mokslininkams teko gerokai paplušėti, nes gyvenimo Žemėje patyrimas toli gražu neatspindi tos įvairovės ir egzotikos, kuria pasižymi kosmosas. Dar daugiau – pasirodo viskas Visatoje yra harmoningai susipynę į vieną visumą. Visatos visuotiniai dėsniai įtakoja elementariųjų dalelių, atomų branduolių, atomų ir viso, kas iš jų padaryta, savybes, o šios elementariosios struktūros savo ruožtu nulemia reiškinius Visatoje.

Šioje vadovėlio dalyje supažindinsime su naujausiais fizikos laimėjimais, teorijomis ir modeliais, kurie šiuo metu labiausiai plėtojami ir, aišku, sparčiausiai kinta.

Reliatyvumo teorijos ir kvantinės mechanikos pagrindinės idėjos buvo suformuluotos dar dvidešimtojo amžiaus pradžioje, tačiau iš esmės materijos ir Visatos suvokimą jos praplėtė pastaraisiais 50 metų. Todėl nenuostabu, kad šiuolaikinis materijos kilmės aiškinimas dar tik skinasi kelią į daugelio visuomenės narių sąmonę.

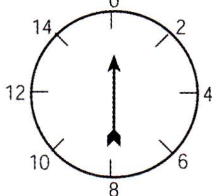
Dėstymas grindžiamas jau išnagrinėta medžiaga. Einšteino reliatyvumo teorija, aprašyta 25 skyriuje, yra susijusi su 2 skyriaus medžiaga „Judėjimas erdvėje ir laike“. 26 skyriaus „Giliausieji materijos klodai“ teiginiai glaudžiai susiję su atomų, branduolių ir kvantinės mechanikos sampratomis, išdėstytomis 17 skyriuje „Atomai, spektrai ir kvantai“. Astrofizikos (27 skyrius) ir kosmologijos (28 skyrius) naujovės turi glaudų ryšį su fizikinėmis idėjomis ir teorijomis, pateiktomis 25 ir 26 skyriuose.

25 Erdvėlaikio fizika

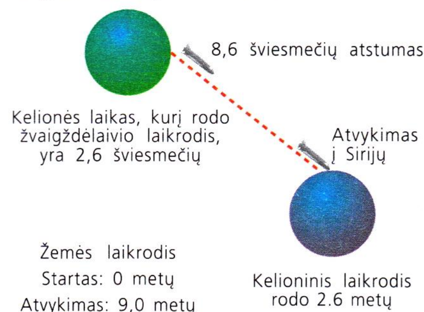


Išvykimas: 0 metų

Žvaigždėlaivio kelioninis laikrodis

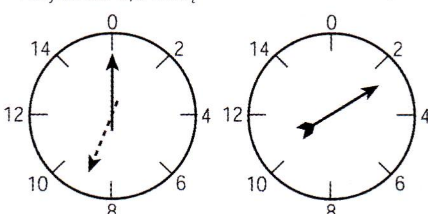


Žvaigždėlaivis išvyksta iš Žemės



Žemės laikrodis
Startas: 0 metų
Atvykimas: 9,0 metų

Kelioninis laikrodis rodo 2.6 metų



Kelionė į Sirijų: kelionėje praleistas laikas yra 2,6 metų; Žemėje praslinko 9 metai.
Kitas pavyzdys: matuojant laiką Žemėje esančiu laikrodžiu, šviesai praskrieti nuo vieno mūsų galaktikos – Paukščių Tako – krašto iki kito reikia 120 000 metų. Žvaigždėlaivio, skriejančio greičiu, artimu šviesos greičiui, laikrodis parodytų, kad kelionė truko tik keletą dienų. Taigi žvaigždėlaivio keleiviams tas laikotarpis būtų gana nežymus, o Žemėje likusiems tai būtų beveik amžinybė.

„JUDĖKIME GREITAI...“

NASA paleido kosminį laivą VOYAGER 2 dar 1977 metais. Jo misija buvo aplankyti išorines Saulės sistemos planetas, jas iš arti nufotografuoti ir kitaip pamatuoti kai kurias jų savybes. Erdvėlaivio kelionė iki Neptūno, paskutinio jo tyrinėto Saulės sistemos kūno, truko 12 metų. Šiuo metu jis jau kerta Saulės sistemos ribas ir maždaug 10 kilometrų per sekundę greičiu juda Sirijaus link. Sirijus yra palyginti netolima žvaigždė, jos atstumas nuo Žemės sudaro tik 8,6 šviesmečių, ir Voyager 2 kelionė iki jo truks apie 300 000 metų.

Pagal reliatyvumo teorijos dėsnius bet koks masyvus kūnas gali judėti greičiu, mažesniu už šviesos greitį c, kuris yra apie 3×10^8 metrų per sekundę. Bet pagal tuos pačius dėsnius net ir toks kūnas gali nuskrieti į Sirijų greičiau nei ta kelionė truktų skaičiuojant jos laiką įprastiniu būdu.

Jei galėtume pažeisti fizikos dėsnius ir judėti bent jau šviesos greičiu, tokia kelionė pirmyn ir atgal truktų 17,2 metų. Tokiu atveju, kaip teigia reliatyvumo teorija, laikrodis, esantis tame laive, rodytų laiką lygų nuliui!

Įdomu, kiek laiko galima sutaupyti judant dar įmanomu greičiu, bet jau *artimu* šviesos greičiui? Atsakymas priklauso ne tik nuo to, kokiu *greičiu* juda laivas, bet ir nuo to, kur yra tą laiką matuojantis laikrodis. Nors šios mintys gana keistos, matematika čia paprasta. Tarkime, NASA planuoja, kad 8,6 šviesmečių atstumą laivas nuskries per 9 metus. Tokiu atveju jis turėtų skrieti greičiu, lygiu $0{,}956c$, t. y., $8{,}6c/9{,}0$. Reliatyvumo teorijoje laikas ir erdvė yra visiškai lygiaverčiai, todėl laiką galima skaičiuoti naudojantis Pitagoro teoremos analogu:

$$(\text{laikas, rodomas laive esančio laikrodžio})^2 = (\text{laikas, rodomas NASA laikrodžio})^2 - (\text{atstumas iki Sirijaus šviesmečiais})^2$$

Įrašę vertes gauname:

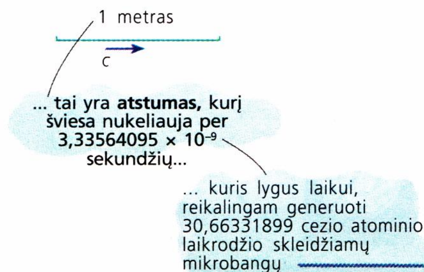
$$(\text{laikas, rodomas laive esančio laikrodžio})^2 = (9)^2 - (8{,}6)^2$$

Atlikę veiksmus gauname, kad laive kelionės metu praeis tik 2,6 metų. Tuo tarpu misijos kontrolės komanda Hjustono valdymo centre užfiksuos 9 metų laikotarpį. Jei dar įskaitysime ir grįžimo laiką, gausime, kad tuo metu, kai astronautai pasens 5,3 metų, NASA pareigūnų, likusių Žemėje, amžius pailgės 18 metų.

Tai gerai žinomas „dvynių paradoksas“: dvynys, praleidęs laiką erdvėlaivyje, sugrįš į Žemę jaunesnis nei jo brolis, visą tą laiką buvęs Žemėje. Paradoksas ne tai, kad skirsis dvynių amžius, o tai, dėl ko efektas nėra simetriškas: juk žvelgiant skriejančiojo dvynio akimis, likęs Žemėje juda nuo jo tokiu pat greičiu, tai kodėl gi būtent jis susitikimo metu neturėtų būti jaunesnis?

1 ERDVĖ IR LAIKAS

1-os d. 2 skyriuje (Judėjimas erdvėje ir laike) jau aptarėme, kad šiuolaikinėje fizikoje egzistuoja glaudus ryšys tarp erdvės ir laiko, ir nurodėme, kad pagrindinė juos siejanti grandis yra *šviesos greitis*. Atstumai matuojami metrais, o metras apibrėžiamas kaip atstumas, kurį *šviesa nuskrieja per tam tikrą laiką*. Šiame skyriuje panagrinėsime šį ryšį dar nuodugniau ir pateiksime išvadas, išplaukiančias iš Alberto Einšteino idėjų, pirmą kartą paskelbtų 1905 metais.



25.1 pav. Šviesa, sklindanti kaip mikrobangos, spinduliuojamos cezio atomo, apibrėžia ir laiką, ir atstumą

■ Žr. 1 klausimą.

Šviesos greičio pastovumas

Visos Einšteino idėjos pagrįstos teiginiu, kad šviesos greitis vakuume yra pastovus visiems stebėtojams. Kad ir kaip greitai jūs keliautumėte, šviesa visada prašvilps pro jus (iš priekio, iš užpakalio ar iš šono, tai visai nesvarbu) tuo pačiu greičiu, lygiu $2{,}99792458 \times 10^8$ m/s. Jeigu važiuojate mašina, galite šiek tiek padidinti greitį ir pavyti priekyje važiuojančiuosius, bet niekada, kad ir kaip greitai judėtumėte, netgi šviesos greičiu, nė per sprindį *nepasivysite* šviesos fronto, nes visų bet kaip judančiųjų atžvilgiu šviesa visada juda tuo pačiu greičiu. Taigi ji nepaklūsta įprastiniams *reliatyvaus* judėjimo dėsniams. Būtent dėl šios savybės Einšteinas pavadino savo teoriją **reliatyvumo principu**.

Iš šio principo išplaukia, kad *pastoviu greičiu* vienas kito atžvilgiu judančių stebėtojų matuojami *atstumai, laiko intervalai ir laikai, kada įvyksta vienas ar kitas įvykis*, skiriasi. Būtent tokių objektų, judančių vienas kito atžvilgiu pastoviais greičiais, savybes mes ir panagrinėsime šiame skyriuje.

Laiko sulėtėjimas reiškia, kad procesai judančiuose mūsų atžvilgiu objektuose trunka ilgiau. Šis efektas ypač žymus tada, kai santykiniai greičiai artėja prie šviesos greičio. Dėl laiko sulėtėjimo stebimi ir kiti reiškiniai: objektai *sutrumpėja* judėjimo kryptimi (**Lorenco susitraukimas**), o jų *masės padidėja*. Iš šių samprotavimų išplaukė žinomiausia, bet mažiausiai suprantama fizikos formulė $E = mc^2$.

Savo **specialiąją reliatyvumo teoriją (principą)** Einšteinas paskelbė 1905 metais. Kosmologijai ir dalelių bei branduolio fizikai ji padarė esminę įtaką; tai aptarsime 26–28 skyriuose. Šiame skyriuje išsamiai nagrinėsime pačios teorijos pagrindus.

Pradėkime nuo laiko.

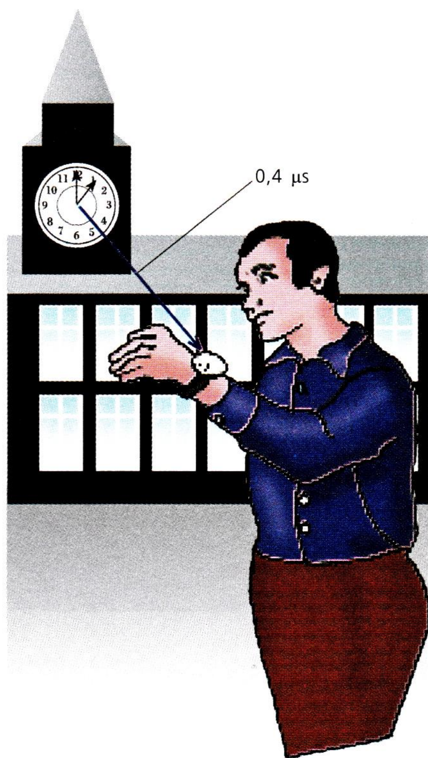
2 LABAI TRUMPA LAIKO ISTORIJA

Laiko samprata yra esminė reliatyvumo (Einšteino) teorijoje, todėl prisiminsime keletą laiko savybių ir matavimo būdų, kuriuos turėtumėte laikyti visiškai patikimais.

Laikas ir laikrodžiai

Laikrodžių funkcijos yra dvi. Pirma – jie rodo *paros laiką*, o antra – juos naudojant galima matuoti *laiko intervalus*. Septynioliktojo šimtmečio pradžioje ištobulėjus ir tapus prieinamiems mechaniniams laikrodžiams atrodė, kad šis prietaisas matuoja kažką labai pastovaus. Anot Niutono:

Absoliutus, tikras ir matematiškai griežtai apibrėžtas laikas pats savaime ir pagal savo prigimtį teka nekintamai ir nepriklausomai nuo bet kokio išorinio poveikio...



25.2 pav. **Sieninio ir rankinio laikrodžio rodmenų palyginimas**

Niutonas netgi apibrėžė tam tikrą abstraktų laiką, nefiksuojamą laikrodžiais, tik ši jo naujovė pasisekimo neturėjo.

Kieno tas laikas?

Miujonas yra nestabili elementarioji dalelė, gimstanti susidūrus atomui su didelės energijos dalele, pagreitinta greitintuvo ar atsklidusia su kosminiais spinduliais. Miujonas labai skvarbus ir trumpai gyvuojantis, – jo pusėjimo trukmė sudaro tik apie vieną milijonąją sekundės dalį. Tačiau fizikai, tiriantys didelių energijų procesus, žino, kad miujonų gyvavimo laikas yra daug kartų didesnis. Taip yra todėl, kad išoriniam stebėtojui ir pačiam miujonui laikas bėga ne tuo pačiu greičiu.

Laikrodžio nustatymas

Laikrodis yra prietaisas laikui matuoti. Paprastuose laikrodžiuose naudojamos virpesių sistemos, tokios kaip švytuoklė ar kvarco kristalas. Labai ilgi laiko intervalai, tokie kaip Žemės amžius, matuojami pagal radioaktyviųjų branduolių pusėjimo trukmę. Laiką tam tikra prasme gali nusakyti ir miujonų srauto pusėjimo trukmė. Taigi ir radioaktyvieji branduoliai, ir miujonų pluoštas yra, galima sakyti, laikrodžiai. *Kaip palyginti visų šių laikrodžių rodmenis?*

Įsivaizduokime, kad visais laikrodžiais galima išmatuoti laiką vienos mikrosekundės tikslumu. Tarkime, jūs norite sutikslinti savo laikrodį su bokšto laikrodžiu. Gerai, jei bokšto laikrodis muša vidurdienį ir jūsų laikrodis rodo tą patį. Tačiau tarkime, bokšto laikrodis yra nuo jūsų už 120 metrų; kai jūs matote, kad jo rodyklės rodo vidurdienį, iš tikrųjų jau yra vidurdienis plius $120/c$ sekundžių (čia c yra šviesos greitis). Taigi jūsų rankinis laikrodis neišvengiamai vėluoja 0,4 mikrosekundės.

Jeigu tikrinate laikrodį pagal radijo signalą, tai paklaidos gali būti netgi milisekundžių eilės, nes laikrodžio skleidžiamas signalas iš pradžių turi pasiekti radijo stotį, o tik po to – jūsų aparatą. Tai jau labai didelis laiko intervalas, nes, pavyzdžiui, kompiuterio, kurio darbinis dažnis yra 100 MHz, laiko matavimo tikslumas yra 10^{-8} sekundžių.

Aišku, žmogui, siekiančiam maksimalaus tikslumo, tai išsprendžiama problema. Jei žinote, kur yra pagrindinis laikrodis, pagal kurį reikia derinti visus kitus, tai galite apskaičiuoti uždelsimą ir nusistatyti savo laikrodį visiškai tiksliai. Kita vertus, nepriklausomai nuo to, kiek užtrunka, kol ateina signalas, ir kaip tiksliai nustatytas jūsų laikrodis, jūs visada galite tiksliai išmatuoti *laiko intervalus*.

Problemos prasideda tada, kai laikrodžiai ima judėti *vienas kito atžvilgiu*...

3 JUDANTYS LAIKRODŽIAI IR FIZIKOS DĖSNIAI JUDANČIOSE ATSKAITOS SISTEMOSE

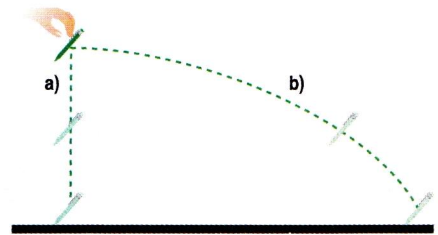
Priminimas apie įprastinį reliatyvumą

Jau anksčiau, 1-os d. 2 skyriuje, esame išsiaiškinę *atskaitos sistemos* sąvoką ir „įprastinį reliatyvumą“. Atskaitos sistema galite būti ir jūs pats, ir jūsų laboratorija, ir jūsų matavimo prietaisai.

Prieš keturis šimtus metų Galilėjus suprato, kad eksperimentuodamas tik su daiktais, judančiais Žemės paviršiuje, jis niekaip negalės nustatyti, ar Žemė stovi vietoje, ar juda kokiu pastoviu greičiu. Kaip argumentą jis pasitelkė žuvelės akvariume, įtaisytame laivo kajutėje, pavyzdį.

Žuvelė juda akvariume vienodai, nesvarbu ar laivas stovi prie kranto, ar plaukia pastoviu greičiu ramioje jūroje. Stebėdami akvariumą ir plaukiojančią jame žuvelę, jokios informacijos apie laivo judėjimą negausime – tam būtinai teks pro kajutės langą pažvelgti į krantą.

Įsivaizduokite, kad sėdėdamas prie stalo pakeliate į kelių centimetrų aukštį pieštuką ir paleidžiate jį iš rankų. Jis krinta vertikaliai žemyn, tai akivaizdu. Tas pats atsitinka, jei atliekate tokį patį veiksmą sėdėdamas prie stalo pastoviu greičiu važiuojančiame traukinyje ar netgi lėktuve. Taigi atskaitos sistemoje, judančioje kartu su jumis, vyksta visada tas pat (prisiminkite 1-os d. 19 p. 2.19 pav.). Kitaip šis įvykis atrodo, jei yra stebimas iš nejudančios sistemos. Pieštukas ne tik krinta žemyn, bet dar ir juda kartu su traukiniu į priekį, taigi dalyvauja gerokai sudėtingesniame judėjime (25.3 pav.).



25.3 pav. **Pieštuko mėtymas dviejose atskaitos sistemose:** a) **keleivio ir** b) **stacionaraus stebėtojo**

Jei jums per sunku suprasti, dar kartą perverskite 1-os d. 2 skyriaus 18–20 puslapius.

Taigi traukinio judėjimas keičia pieštuko trajektoriją. Tai visai ne keista, nes mechanikos dėsniai reikalauja, kad greičiai šiuo atveju būtų sumuojami.

Šviesa elgiasi visai ne taip, kaip pieštukas ar koks nors kitas materialus kūnas

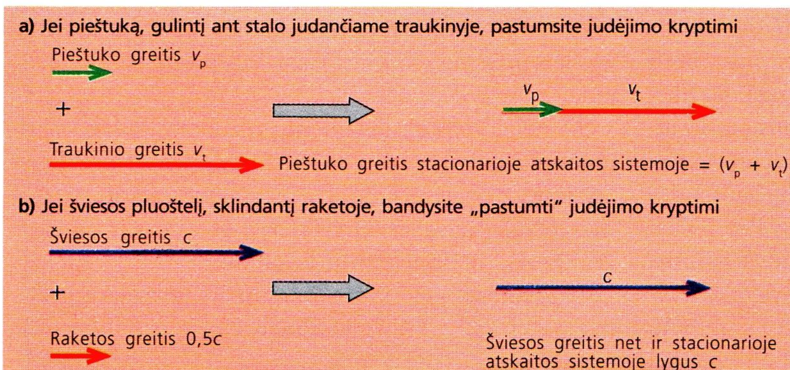
Keisčiausias faktas, paaiškėjęs devynioliktojo amžiaus gale, buvo tas, kad šviesa elgiasi visai ne taip kaip aprašytasis pieštukas, jos judėjimas yra toks pat visose atskaitos sistemose. Vaizdas netgi nepanašus į tą, kurį stebime, kai šaudoma iš judančio ginklo. Pavyzdžiui, jei ginklas juda link taikinio, kulkos įsminga į taikinį didesniu greičiu. Tai atitinka Galilėjaus ir Niutono teiginius, kad bet kokio kūno (šiuo atveju kulkos) judančioje atskaitos sistemoje greitis lygus tos sistemos (ginklo) ir paties daikto (kulkos) greičių sumai. Eksperimentuotojai tikėjosi, kad pagal šį dėsnį sklis ir šviesa, spinduliuojama šaltinio, judančio imtuvo kryptimi. Deja, daug kruopščiausiai atliktų eksperimentų parodė, kad taip neatsitinka.

A. Maikelsono (*Albert Michelson*) ir E. Morlio (*Edward Morley*) eksperimentai, aprašyti išplėstiniame intarpe, buvo vieni kruopščiausių ir įtikinamiausių. Šių eksperimentų išvadą galima suformuluoti taip: jei jūs skriejate raketoje, judančioje greičiu, lygiu pusei šviesos greičio, ir pasiunčiate šviesos signalą, tai šviesa judės šviesos greičiu ne tik jūsų sistemoje (judančioje kartu su raketa), bet ir *bet kokioje kitoje, judančioje jūsų atžvilgiu pastoviu greičiu*. Palyginkime tai su pieštuko kritimu traukinyje:

■ Žr. 2 klausimą.

Pieštukui: pieštuko greitis v_p plius traukinio greitis $v_t = v_p + v_t$
Šviesai: Šviesos greitis c, sudėtas su raketos greičiu, lygiu $0{,}5c$, vis tiek lygus c.
Šį rezultatą iliustruoja ir 25.4 pav.

Šio rezultato prasmė yra labai gili, jį paaiškinus gamtos suvokimas iš esmės pakito.



25.4 pav. a) **Kūnų judėjimas atitinka Galilėjaus idėjas ir Niutono dėsnius: greičiai sumuojasi.** b) **Šviesa negali judėti nei greičiau, nei lėčiau – tik šviesos greičiu**

Maikelsono ir Morlio eksperimentas



25.5 pav. **A. Maikelsonas (*Albert Michelson*) gimė Strelno mieste Lenkijoje, emigravo į Jungtines Valstijas ir ten tapo fiziku. Dėstydamas JAV Karo Akademijoje jis pradėjo savo tyrimus, kuriuos tęsė vėliau tapęs fizikos profesoriumi Klyvlendo mieste, Ohajo valstijoje. Būtent ten jis, bendradarbiaudamas su chemijos profesoriumi E. Morliu (*Edward Morley*), ir atliko šiuos puikius eksperimentus, kurių rezultatas sudavė pirmą smūgį idealiai suderintam pasaulio vaizdui, kurį fizikai buvo sukūrę besibaigiant devynioliktajam amžiui**

Devynioliktajame amžiuje atrodė akivaizdu: jei šviesa yra bangos, tai ji gali plisti tik materialioje aplinkoje. Kita vertus, buvo žinoma, kad šviesa sklinda ir vakuume; taigi pats vakuumas turėjo turėti tam tikrų materialiosios aplinkos savybių. Panašiai kaip garso bangos, sklindančios ore, šviesos bangos irgi buvo įsivaizduojamos kaip kažkokie virpesiai, plintantys **skaidriu eteriu** (æther), užpildančiu visą Visatą – ir erdvę, ir visus materialiuosius kūnus. Šviesa ir visa kita, kas tik juda, plinta būtent šiuo eteriu.

Pradedant nuo 1880 metų, amerikietis fizikas, JAV karo pajėgų karininkas Albertas Maikelsonas (25.5 pav.) pradėjo matuoti greitį, kuriuo juda Žemė eteryje. Užduotis pasirodė esanti kur kas sudėtingesnė nei buvo iš pradžių tikėtasi. Albertui Maikelsonui persikėlus į Klyvlendo universitetą Ohajo valstijoje, prie šių tyrimų prisijungė ir chemijos profesorius E. Morlis.

Eksperimentuose jie nutarė remtis prielaida, kad šviesa eterio atžvilgiu visada juda pastoviu greičiu, lygiu c. Svarbiausias tyrimų tikslas buvo išmatuoti greitį, kuriuo Žemė juda eterio, o tuo pačiu – ir šviesos, atžvilgiu. Jie samprotavo, kad jei, pavyzdžiui, Žemė juda eteryje *ta pačia* kryptimi, kaip ir šviesos pluoštelis, tai šviesa Žemės atžvilgiu turėtų judėti greičiu, *mažesniu* nei c. Įsivaizduokite kelią (eteris), kuriuo važiuoja dviratininkas (Žemė). Automobilis (šviesa) pasiveja dviratininką ir jį lenkia. Akivaizdu, kad automobilio greitis dviratininko atžvilgiu yra mažesnis, nei jo greitis kelio atžvilgiu.

Taigi jei Žemė juda greičiu v ta pačia kryptimi, kaip ir šviesos pluoštelis, jų greitis vienas kito atžvilgiu turi būti mažesnis už c ir lygus $(c - v)$. O jei Žemės ir pluoštelio judėjimo kryptys priešingos, tai jų greitis vienas kito atžvilgiu turi būti lygus $(c + v)$.

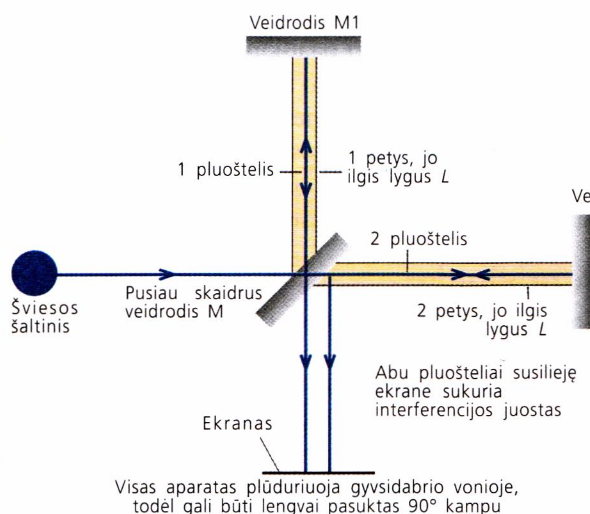
Kadangi Žemės skriejimo aplink Saulę kryptis kinta, eksperimentuotojai sukonstravo prietaisą, skirtą matuoti įvairiomis kryptimis sklindančios šviesos greitį. Kadangi dėl minėto sukimosi kas pusę metų Žemė keičia savo judėjimo kryptį į priešingą, jie tikėjosi, kad jos judėjimas įvairiomis kryptimis eterio atžvilgiu turi kaip nors atsiliepti šviesos judėjimo greičiui Žemės atžvilgiu. Interferometras, kurį jie naudojo šiems matavimams, parodytas 25.6 pav. Paprasčiau sakant, jie nutarė išmatuoti laikus, kuriuos užtrunka šviesos spindulių pluošteliai, nusklisdami vienodus atstumus dviem statmenomis kryptimis. Jei Žemė būtų parimusi eterio atžvilgiu, tai abu laikai būtų visiškai vienodi, tačiau jei ji judėtų kuria nors viena kryptimi, tai pluoštelių sklidimo laikai turėtų skirtis.

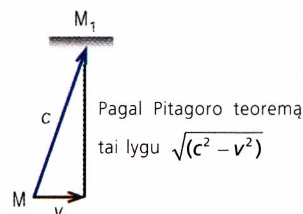
Maikelsono ir Morlio eksperimento, atlikto beveik prieš šimtą metų, įranga ir idėja buvo labai modernios. Pasirinkta šviesa buvo monochromatinė, taigi abu pluošteliai sklido tokiu pat dažniu ir vienodu greičiu. Žinoma, tiesiogiai išmatuoti jų sklidimo trukmę buvo nerealu, todėl protingiau buvo matuoti, kiek daugiau šviesos bangų yra viename eksperimento įrenginio petyje, išilgai kurio juda pluošteliai, negu kitame. Kuo labiau skiriasi sklidimo skirtingais petimis laikai, tuo labiau turi skirtis ir bangų skaičiai. Grįžusiems pluošteliams persidengus, bangų skaičiaus skirtumas turėtų būti matomas kaip interferencinės juostos. Pagal šių juostų pobūdį būtų nesunku apskaičiuoti bangų skirtumą, taigi ir laiko, kurį pluošteliai užtruko sklisdami skirtingomis trajektorijomis, skirtumą. Prietaisas buvo toks jautrus, kad būtų galima užfiksuoti vienos šimtosios bangos ilgio t skirtumą. Dėl skirtumo tarp gerai žinomo Žemės judėjimo orbita apie Saulę greičio, kuris visiškai pagrįstai buvo prilygintas jos greičiui eterio atžvilgiu, ir šviesos greičio, turėjo susidaryti apie keturios šimtosios t, todėl šis skirtumas turėjo būti pastebėtas. Paprasti matematiniai skaičiavimai, kuriais pagrįstas šis eksperimentas, pateikti tekste prie 25.6 pav.

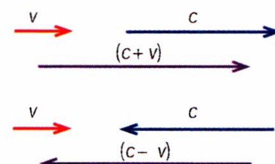
Deja, eksperimentuodami jie nė karto nepastebėjo jokio interferencinio vaizdo; bangų skaičiaus, taigi ir sklidimo trukmės, skirtumas visada buvo lygus nuliui. Tai galėjo reikšti, kad Žemė eterio atžvilgiu visada, netgi tada, kai jos judėjimo Saulės atžvilgiu kryptis visiškai priešinga ankstesniajai, yra parimusi, t. y. nejuda.

Šis neigiamas eksperimentų rezultatas, kuris buvo galutinai patvirtintas 1887 m., atsisakant nerealaus aiškinimo, paremto tuo, kad eteris juda kartu su Žeme, galėjo būti paaiškintas dar vienu, nors ir ne mažiau keistu, būdu, paremtu teiginiu:

elektrinės jėgos, kurias būtent ir perneša šviesos bangos, sukelia kūnų, judančių eterio atžvilgiu, sutrumpėjimą.







Pusiau skaidrus veidrodis M perskelia šviesos pluoštelį į dvi dalis.
1 pluoštelis sklinda išilgai 1 peties, 2 pluoštelis – išilgai 2 peties; abiejų pečių ilgiai vienodi, lygūs L.
2 pluoštelis, judėdamas į dešinę, Žemės atžvilgiu juda greičiu, lygiu $(c - v)$.
Atsispindėjęs nuo veidrodžio M_2, jis grįžta atgal greičiu, lygiu $(c + v)$.
Taigi, visa 2 pluoštelio kelionė nuo M iki M_2 ir atgal trunka:

$$T_2 = \frac{L}{c-v} + \frac{L}{c+v} = \frac{2Lc}{c^2 - v^2} = \frac{2Lc}{c^2\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)} = \frac{2L}{c}\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1}$$

1 pluoštelis ir link veidrodžio M_1, ir atsispindėjęs nuo jo, juda tuo pačiu greičiu $\left(c^2 - v^2\right)^{\frac{1}{2}}$, taigi

visa jo kelionė trunka $T_1 = \dfrac{2L}{(c^2 - v^2)^{\frac{1}{2}}}$

Tai gali būti perrašyta kaip: $T_1 = \dfrac{2L}{c}\left(1 - \dfrac{v^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}}$

Taigi laikų skirtumas $T_2 - T_1 = \Delta T = \dfrac{2L}{c}\left[\left(1 - \dfrac{v^2}{c^2}\right)^{-1} - \left(1 - \dfrac{v^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}}\right]$

Kadangi v^2/c^2 yra labai mažas, atskleidę skliaustelius ir pritaikę binomo teoremą gauname:

$$(1 - x)^n = 1 - nx \text{ (kai } x << 1)$$

Sutvarkę išraišką gauname, kad ΔT yra lygi Lv^2/c^2.
Maikelsonas ir Morlis eksperimentiškai ΔT vertę nustatė pasukę visą aparatą 90° kampu, tai yra sukeitę pečius vietomis. Po šio pasukimo interferencijos raštai turėjo pasikeisti, o pluoštelių kelių skirtumas – padvigubėti.

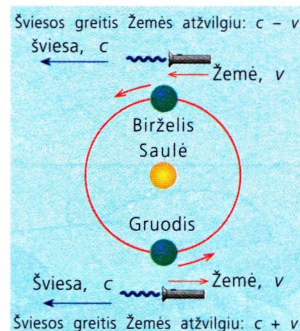
$$\text{Kelių skirtumas} = c \times 2\Delta T$$

atitinka n interferencijos juostų poslinkį, lygų:

$$\text{kelių skirtumas} = n\lambda = 2c\Delta T$$

Taigi $$n = \frac{2c\Delta T}{\lambda} = \frac{2Lv^2}{\lambda c^2}$$

25.6 pav. **Viršuje: interferometras, kurį Maikelsonas ir Morlis naudojo matuoti Žemės greičiui eterio (erdvės) atžvilgiu ir jų rezultatų matematinis paaiškinimas. Apačioje: rezultatai, kuriuos Maikelsonas ir Morlis tikėjosi gauti eksperimento metu**



?

A 25.6 pav. Aptartame prietaise ilgis L lygus 10 m, šviesos bangos ilgis yra 5×10^{-7} m. Įrodykite, kad tokiu atveju juostų poslinkis turėtų būti lygus 0,4, jei Žemė juda 30 km/s greičiu.

Tai buvo **Lorenco ir Ficdžeraldo** paskelbta susitraukimo teorija. Ji paaiškino eksperimento rezultatą, bet nevedė niekur toliau, nes šis paaiškinimas atrodė labai jau nerealus ir daugiau niekaip nebuvo pagrįstas.

Tiktai 1905 m. Einšteinas, kuris tikriausiai net nežinojo apie Maikelsono ir Morlio eksperimentus, paskelbė žymiai radikalesnę teoriją, paremtą dviem prielaidomis apie šviesos savybes. Teorija ne tik paaiškino neigiamą šio eksperimento rezultatą, bet ir nusakė daug kitų, tuo metu dar net neaptiktų, „reliatyvistinių“ efektų.

4 EINŠTEINO TEORIJA

Albertas Einšteinas sukūrė teoriją, kuri paaiškino neigiamą Maikelsono ir Morlio eksperimento rezultatą. Lorenco ir Ficdžeraldo teorija turėjo didelį trūkumą – ji galėjo paaiškinti tik vieną reiškinį (žr. išplėstinį intarpą). Einšteinas išvedė formulę, kuri šį susitraukimą paaiškino remdamasi vieninteliu (nors ir iš pirmo žvilgsnio neįtikimu) teiginiu apie šviesos greičio pastovumą visose inercinėse sistemose.

Dvi Einšteino prielaidos

Einšteinas labai vykusiai atsižvelgė į elektromagnetinę šviesos prigimtį. Jo teorija buvo paremta tik dviem prielaidomis arba „postulatais":

- Mechanikos, optikos, elektromagnetizmo ir kiti fizikos dėsniai yra tokie patys visose tiesiaeigiai ir tolygiai viena kitos atžvilgiu judančiose sistemose.
- Šviesos greitis vakuume yra visiškai vienodas visiems stebėtojams, esantiems tiesiaeigiai ir tolygiai viena kitos atžvilgiu judančiose atskaitos sistemose.

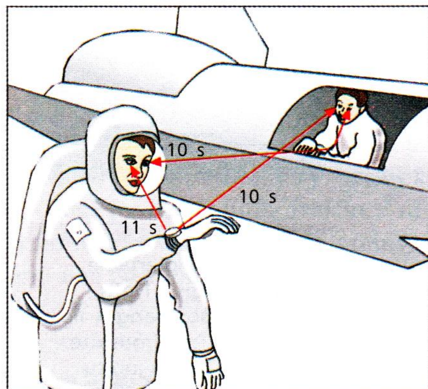
Prisiminkime: atskaitos sistema yra visuma kūnų, tokių kaip stalai, kėdės, laikrodžiai, liniuotės, kiti matavimo prietaisai, kurie nejuda jūsų atžvilgiu. Jūs kartu su šiais prietaisais galite judėti kitų kūnų atžvilgiu (įsivaizduokite darą eksperimentus judančiame traukinyje). Analogiški eksperimentai, daromi kitame traukinyje, judančiame jūsų atžvilgiu, jau bus atliekami kitoje inercinėje sistemoje.

Inercinėmis vadinamos **atskaitos sistemos,** kurios juda viena kitos atžvilgiu pastoviu greičiu, t. y. be pagreičio ir tiesiomis linijomis. Jeigu atskaitos sistemos sukasi viena kitos atžvilgiu, susidariusios išcentrinės, arba Koriolio, jėgos neleidžia tiesiogiai pritaikyti Niutono sąryšio $F = ma$, ir tokios atskaitos sistemos viena kitos atžvilgiu nėra inercinės.

5 LAIKO SUSITRAUKIMAS – LAIKO SULĖTĖJIMAS

Pirmoji ir labai netikėta Einšteino reliatyvumo principo išvada buvo laiko sulėtėjimas. Ji reiškė, kad:

Procesas, kuris judančioje sistemoje užtrunka tam tikrą laiką, stebėtojui, esančiam šios sistemos išorėje, atrodo trunkąs ilgiau, nei stebėtojui, judančiam kartu su ta sistema.

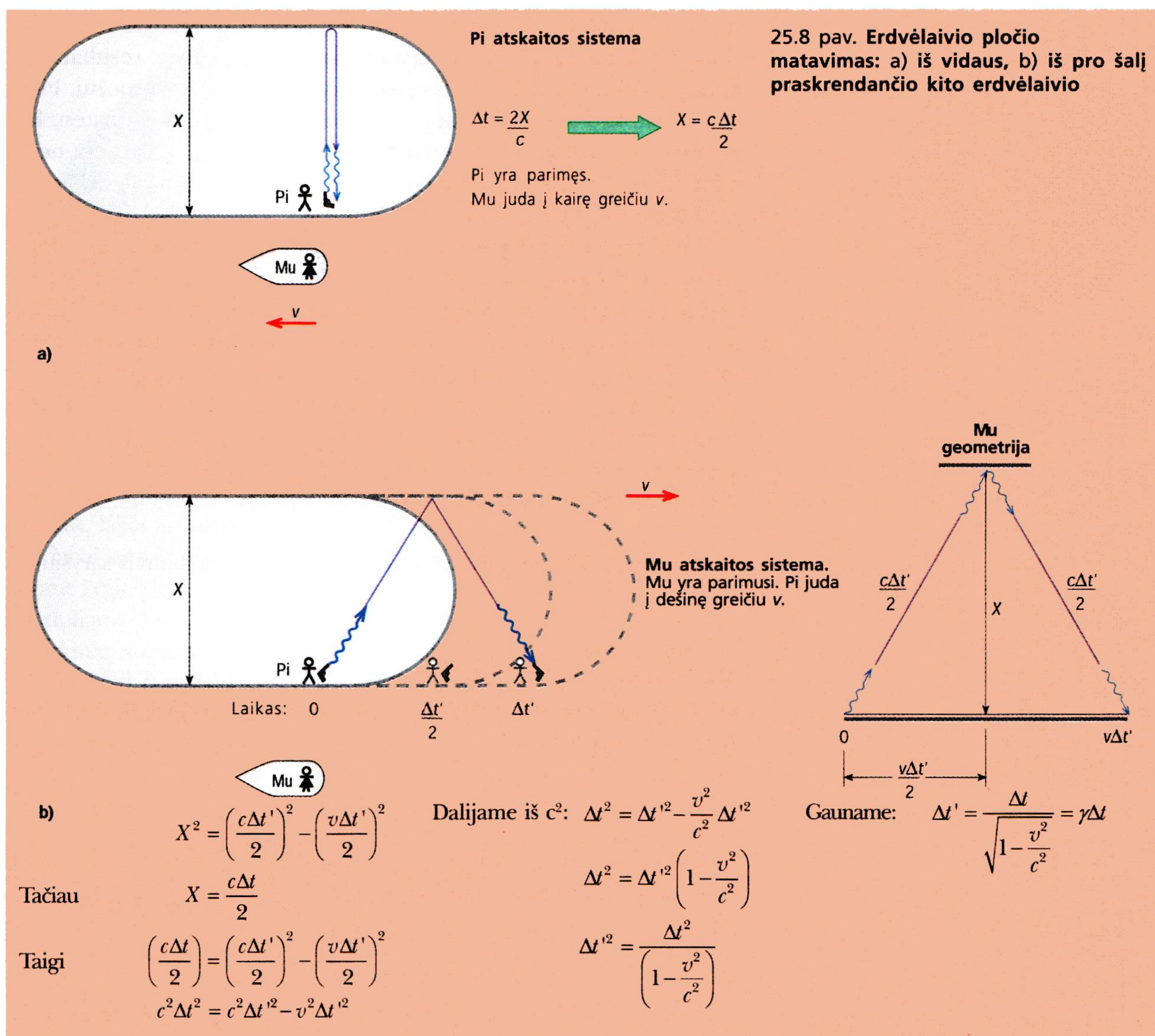


25.7 pav. **Laikas, matuojamas išorinėje ir vidinėje sistemose**

Kaip parodyta 25.7 pav., išorinis stebėtojas mato, kad per 10 sekundžių trukmę, fiksuojamą raketoje esančio laikrodžio, jo rankinis laikrodis rodo 11 sekundžių trukmę. Stebėtojas, esantis raketoje, patvirtina tą patį – per laiko tarpą, jo laikrodžio išmatuotą 11 sekundžių trukmę, išorinio stebėtojo laikrodis nueina tik 10 sekundžių. Kiekvienas jų visiškai pagrįstai nutaria, kad kito laikrodis eina per lėtai, nes situacija yra visiškai *simetriška*: ir pirmasis stebėtojas antrojo stebėtojo atžvilgiu, ir antrasis pirmojo atžvilgiu juda tuo pačiu greičiu (tik į priešingą pusę, bet reliatyvumo teorijoje tai visiškai nesvarbu). Nė vienas jų negali būti parimęs Visatoje ir negali būti atliktas joks eksperimentas, kuris leistų užfiksuoti kokį nors absoliutų judėjimą Visatoje, nes viskas yra ir turi būti reliatyvu.

Matematinis laiko sulėtėjimo įrodymas nereikalauja žinoti nieko daugiau, tik Pitagoro teoremą ir nueito atstumo išraišką – greičio ir laiko sandaugą. Kitiems įrodymams reikia dar mažiau matematikos.

Deja, iškyla dvi problemos: pirmoji – pasitikėjimo galutiniu rezultatu, o antroji – suvokimo, kad laiko sulėtėjimas gali būti svarbus. Einšteinas, vaizdžiai aiškindamas šį reiškinį, buvo pasitelkęs šviesos impulsą, apšviečiantį judantį traukinį. Nors ir akivaizdu, kad traukinio keleivis ir geležinkelio stoties budėtojas, būdami skirtingose atskaitos sistemose, fiksuoja skirtingus šviesos impulso stebėjimo laikus, visumoje tai nėra itin įtikinama laiko sulėtėjimo reiškinio iliustracija.



25.8 pav. **Erdvėlaivio pločio matavimas: a) iš vidaus, b) iš pro šalį praskrendančio kito erdvėlaivio**

$$X^2 = \left(\frac{c\Delta t'}{2}\right)^2 - \left(\frac{v\Delta t'}{2}\right)^2$$

Tačiau $X = \frac{c\Delta t}{2}$

Taigi $\left(\frac{c\Delta t}{2}\right) = \left(\frac{c\Delta t'}{2}\right)^2 - \left(\frac{v\Delta t'}{2}\right)^2$

$$c^2\Delta t^2 = c^2\Delta t'^2 - v^2\Delta t'^2$$

Dalijame iš c²: $\Delta t^2 = \Delta t'^2 - \frac{v^2}{c^2}\Delta t'^2$

$$\Delta t^2 = \Delta t'^2\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)$$

$$\Delta t'^2 = \frac{\Delta t^2}{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)}$$

Gauname: $\Delta t' = \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \gamma \Delta t$

Šiais laikas realesnis atrodytų scenarijus, kai matavimus atlieka erdvėlaiviu skriejantys astronautai. Nereikia manyti, kad reliatyvumo teorija galioja tik kosmose ir yra aktuali tik astronautams. Prisiminkime – tarp jos išvadų, galų gale besiremiančių ir laiko sulėtėjimu, yra gerai žinomas masės ir energijos ekvivalentumo sąryšis $E = mc^2$, t. y. žvaigždžių energija sukūrusi sąlygas atsirasti gyvybei.

Bet grįžkime prie mūsų scenarijaus: astronautas Pi, skriejantis erdvėlaiviu toli kosmose, nutaria pamatuoti savo laivo plotį. Tam jis pasinaudoja savo infraraudonuoju šautuvu, kuris atstumus matuoja pagal laiką, kurį infraraudonosios šviesos impulsas nuskrieja iki tolimosios sienos ir grįžta atgal, kaip parodyta 25.8a) pav.

Tarkime, Pi dvynė Mu stebi jį pro kosminės stoties, kurioje jie abu darbuojasi, langą. Ji nutaria patikrinti Pi matavimus, pasinaudodama tokiu pačiu infraraudonuoju šautuvu, kaip ir Pi, nes suabejoja, ar tikrai šviesos impulsas sklinda taip, kaip parodyta 25.8a) pav.

Grįžus Pi į kosminę stotį paaiškėja, kad jų matavimų rezultatai nesutampa. Mu paaiškina šį skirtumą tuo, kad judant erdvėlaiviui impulsas iš Pi šautuvo sklido ne dvigubą atstumą X, o didesnį atstumą, nes judėjo pirmyn ir atgal trikampio kraštinėmis, pavaizduotomis 25.8b) pav. dalyje pateiktoje schemoje. Taigi ji abejoja, ar Pi naudotas metodas yra

tikslus. Pi nutaria iš pradžių patikrinti, ar jo ir Mu šautuvai yra visiškai vienodi; jie išmatuoja tą patį atstumą kosminėje stotyje, rezultatai sutampa, taigi šautuvų skirtumas paklaidos nesukelia. Savo ruožtu, Pi toliau teigia, kad jam žvelgiant per erdvėlaivio langą aiškiai matėsi, kad juda ne jis, o kosminė stotis, taigi su Mu geometrija kažkas yra ne visai gerai, nes iš tikrųjų būtent jos, o ne jo šautuvo spindulys sklido ilgesnį kelią, ir būtent tai iškraipė rezultatus.

Akivaizdu, abiejų dvynių argumentai yra neįtikinami ir jie negali paaiškinti, kodėl skiriasi jų matavimų rezultatai.

Išgirdęs ginčą stoties viršininkas paaiškina dvyniams, kad nė vienas jų negali būti parimęs, nes Visatoje nėra taško, kurio atžvilgiu galima matuoti judėjimo greitį. Taigi abu jie yra teisūs, nes abu judėjo vienas kito atžvilgiu. Perskaitęs jiems ilgą paskaitą apie Maikelsono ir Morlio eksperimentą, jis įtikina juos, kad *šviesa erdvėje juda tuo pačiu greičiu*, nepriklausomai nuo to, kaip juda „šautuvas" ar stebėtojas.

Galų gale jie nusprendžia, kad (žr. 25.8 pav.):

Mu sutinka, kad atstumas X, išmatuotas Pi, yra išreiškiamas sąryšiu:

$$2X = c\Delta t,\ X = \frac{c\Delta t}{2} \qquad [1]$$

Abu dvyniai sutinka, kad Mu geometrija yra teisinga, ir jos atskaitos sistemoje išmatuotas spindulio sklidimo laikas $\Delta t'$ *skiriasi* nuo Pi išmatuoto ir yra lygus:

$$X^2 = \left(\frac{c\Delta t'}{2}\right)^2 - \left(\frac{v\Delta t'}{2}\right)^2 \qquad [2]$$

Įrašius į šios lygties kairiąją pusę X išraišką iš [1] lygties, galima rasti Pi ir Mu matuotų laiko intervalų sąryšį:

$$\Delta t' = \frac{\Delta t}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} = \Delta t\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}}$$

Šis rezultatas pateiktas ir 25.8 pav. apačioje po matematinių išvedžiojimų; jis vadinamas **laiko sulėtėjimu**. Tai yra tiesioginė šviesos greičio nekintamumo pasekmė ir nurodo laiko intervalą $\Delta t'$, kurį išmatuojame savo laikrodžiu, vykstant procesui laiką Δt sistemoje, judančioje mūsų atžvilgiu greičiu v. Šis sąryšis galioja visiems procesams, kokios prigimties jie bebūtų.

Žr. 3 klausimą. ■

Dydis $\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$, arba $\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}}$, vadinamas **Lorenco daugikliu.**

Jis labai dažnai sutinkamas reliatyvumo teorijoje, todėl, kadangi yra gremėzdiškas ir nepatogus rašyti, dažniausiai sutrumpintai žymimas graikiška raide γ (gama). Taigi laiko sulėtėjimo sąryšis sutrumpintai pateikiamas kaip $\Delta t' = \gamma\, \Delta t$ (žr. 25.8 pav.).

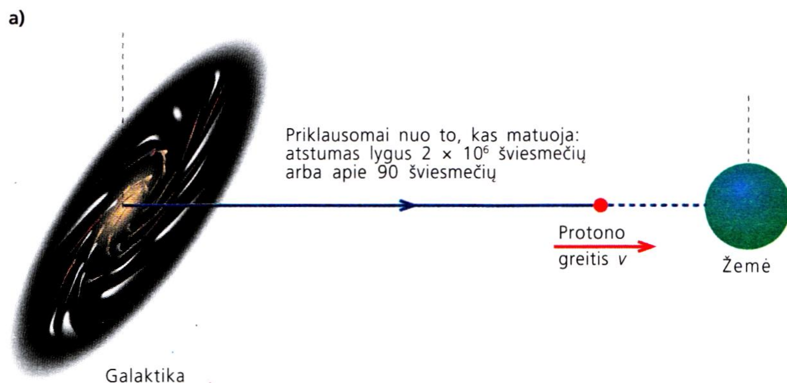
?

B Apskaičiuokite Lorenco daugiklio reikšmę, kai greitis lygus 2×10^8 m/s.

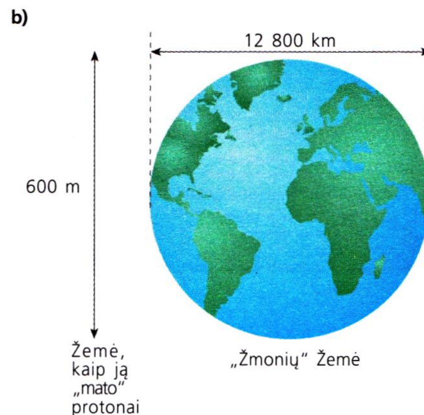
Laiko sulėtėjimas yra simetriškas

Nesunku suvokti, kad laiko sulėtėjimas yra simetriškas ir todėl Pi nuomonė, kad ne jis, o Mu judėjo jo atžvilgiu, irgi yra teisinga. Susikeitę vietomis jie turi gauti visai identiškus rezultatus. Taigi reliatyvumo (Einšteino) teorija yra iš esmės simetriška, ką jau ir anksčiau matėme 25.7 pav.

a)



b)



25.9 pav. **Didelio greičio protonų kelionė į Žemę ir Žemės skersmuo jų požiūriu**

Laiko sulėtėjimo prasmė

Kosminiai spinduliai pasiekia Žemės atmosferos pakraščius judėdami greičiais, labai artimais šviesos greičiui. Daugiausia tai protonai, pagreitinti labai stipriuose elektriniuose ir magnetiniuose laukuose ir susidarę degant žvaigždėms ar sprogstant supernovoms. Kiek laiko reikia šiems spinduliams pasiekti Žemės paviršių?

■ Žr. 4 ir 5 klausimus.

Tarkime, supernova, sprogusi 2 milijonų šviesmečių atstumu nuo Žemės, išspinduliavo protoną, judantį į mus beveik šviesos greičiu, t. y. $0{,}999999999c$. Žiūrint iš Žemės, kaip parodyta 25.9a) pav., jam mus pasiekti reikia kiek daugiau nei 2 milijonų metų. Koks bus šio protono skriejimo į Žemę laikas, išmatuotas jo paties atskaitos sistemoje? Galime apskaičiuoti jį pagal lygtį $\Delta t' = \gamma \Delta t$:

Mūsų išmatuotas laikas = γ × protono laikas

Taigi: protono laikas = mūsų laikas / γ

Šiuo atveju tai yra: $$\gamma = \left(1 - \frac{(0{,}999999999)^2}{1}\right)^{-\frac{1}{2}}$$

Gana tiksliu skaičiuokliu galite suskaičiuoti, kad γ = 22 400.

Todėl protono laikas lygus $= \dfrac{2\ 000\ 000}{22\ 400} = 89{,}3$ metų.

Taigi protonas savo kelionėje užtrunka tik apie 90 metų. Iš tikrųjų daugelis kosminių spindulių protonų juda dar greičiau, ir ši kelionė jų požiūriu kartais gali trukti netgi mažiau kaip vieną sekundę.

■ Žr. 6 klausimą.

Kokį atstumą nuskrieja kosminiai spinduliai?

Atsakymas iš pirmo žvilgsnio atrodo labai aiškus ir paprastas, nes galaktika, iš kurios jie atskrieja, yra nutolusi 2 milijonų šviesmečių ($1{,}9 \times 10^{22}$ m) atstumu. Tačiau paties protono atskaitos sistemoje kelionė trunka tik apie 90 metų, o judėjimo greitis beveik sutampa su šviesos greičiu, t. y. 3×10^8 m/s. Taigi per tą laiką jis gali nukeliauti tik 90 šviesmečių, arba $8{,}5 \times 10^{17}$ m. Taigi atstumas judančiam protonui tarp galaktikos ir Žemės sutrumpėja 22 400 kartų.

Šių, palyginti gana lėtų, kosminių spindulių požiūriu Žemės skersmuo yra tik apie 600 m, kaip matyti 25.9b) pav. Greitesniesiems kosminiams spinduliams Žemė gali pasirodyti dar mažesnė, gal vos keleto centimetrų dydžio. Kadangi reliatyvumo teorijoje viskas reliatyvu, tai tų spindulių požiūriu atrodo, kad Žemė juda jų atžvilgiu. Šie rezultatai vaizdžiai demonstruoja, kad laikas ir erdvė yra labai glaudžiai susiję.

?

C Miujonas gimsta aukštai atmosferoje kosminiams spinduliams susidūrus su deguonies atomo branduoliu. Miujonas juda Žemės link greičiu, lygiu $0{,}998c$. Savo atskaitos sistemoje jo gyvavimo laikas yra 2×10^{-6} s.

a) Įrodykite, kad Žemės atskaitos sistemoje miujono gyvavimo laikas sudaro apie 30 mikrosekundžių.

b) Kokį atstumą miujonas nuskries iki suskildamas:

(i) savo atskaitos sistemoje,

(ii) Žemės (laboratorinėje) atskaitos sistemoje?

Lorenco ir Ficdžeraldo susitraukimas

Skaičiavimai, kuriuos atlikome 293 p., rodo, kad laiko sulėtėjimas sukelia atstumų sutrumpėjimą judančiuose objektuose. Tai ir yra **Lorenco ir Ficdžeraldo susitraukimas**, paminėtas 229 puslapyje. Vartojant jau įprastą sutrumpintą žymėjimą, šis sutrumpėjimas gali būti užrašytas formule

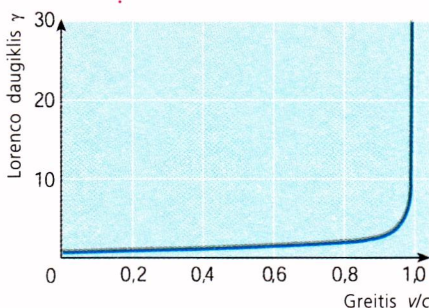
$$x_0 = \gamma x$$

Čia x yra *mūsų išmatuotas* (jo judėjimo kryptimi) ilgis kūno, judančio mūsų atžvilgiu greičiu v; x_0 yra to paties objekto *savasis*, t. y. savo atskaitos sistemoje išmatuotas, ilgis. Palyginimui įsivaizduokite metro ilgio judančią liniuotę. Jos ilgis mūsų atskaitos sistemoje, kai liniuotė parimusi mūsų atžvilgiu, lygus vienam metrui. Kai liniuotė pradeda judėti, ji atrodo mums trumpesnė, todėl norint palyginti jos naująjį ilgį su ankstesniuoju, turime x *padalyti* iš γ, kuris visada yra didesnis už vienetą. Reiškia,

$$x = x_0 / \gamma$$

arba: $x = x_0 \left(1 - \dfrac{v^2}{c^2}\right)^{\frac{1}{2}}$ = **ilgio susitraukimas.**

D Kentauro erdvėlaivis yra rutulio formos. Kokios formos jis atrodys praskriedamas pro jus 0,5c greičiu?



25.10 pav. **Iš grafiko aišku, kad Lorenco daugiklis γ labai sparčiai artėja prie begalybės, kai tik greitis pranoksta 95% šviesos greičio**

Lorenco daugiklio γ prasmė

Esminė Lorenco daugiklio dalis yra dydis $(1 - v^2/c^2)$. Kai v artėja prie c, santykis v^2/c^2 labai greitai artėja prie vieneto, o išraiška skliausteliuose, taip pat ir jos kvadratinė šaknis, labai greitai artėja prie nulio.

Lorenco daugiklis yra atvirkščiai proporcingas šiai kvadratinei šakniai, todėl jai mažėjant jis auga. Dauginant ką nors iš γ, pavyzdžiui, išraiškose $t` = \gamma t$ arba $m = \gamma m_0$ (žr. toliau), tas dydis, artėjant v prie c, įgyja labai dideles vertes. Kai v lygus c, γ lygus begalybei.

Jei kokį nors dydį dalijame iš Lorenco daugiklio, rezultatas esant didelėms v reikšmėms artėja prie nulio. Tokia dalyba ekvivalenti daugybai

iš $\dfrac{1}{\gamma}$, arba iš $\sqrt{1 - \dfrac{v^2}{c^2}}$.

Šie paaiškinimai turėtų padėti geriau suprasti 25.10 pav., kuriame parodyta Lorenco daugiklio priklausomybė nuo v. Grafike matyti, kad daugiklis yra beveik pastovus, kintant v nuo nulio iki maždaug 0,6c. Galų gale, kai v tampa didesnis už 0,995c, Lorenco daugiklis tampa itin jautrus v kitimui ir labai staigiai šauna į begalybę.

E Pagalvokite, kaip pasikeistų kasdieninis gyvenimas, jei šviesos greitis būtų 13 m/s (t. y. apie 47 km per valandą).

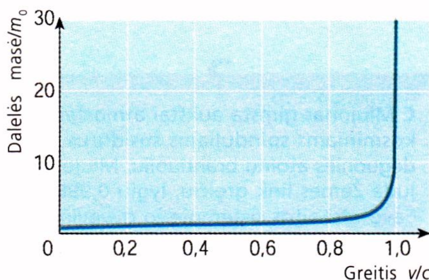
Žr. 7 klausimą. ■

6 MASĖ IR GREITIS

Viena netikėčiausių ir svarbiausių Einšteino reliatyvumo teorijos išvadų yra judančio kūno masės priklausomybė nuo greičio. Jei kūno, parimusio mūsų atskaitos sistemoje, masė yra m_0, o jam judant tampa lygi m, tai jų sąryšis:

$$m = \gamma m_0$$

Kūno **rimties masės** m_0 sąvoka yra labai svarbi dalelių fizikoje. Pateikiamos žinynuose tokių dalelių, kaip elektronas ar protonas, masės yra būtent jų rimties masės. Judant greičiais, mažesniais už 0,2c, dalelių masės yra labai artimos jų rimties masėms (25.11 pav.). Bet jei dalelės greitis artėja prie šviesos greičio, jos masė staiga išauga (sąryšyje ji lygi rimties masei, padaugintai iš Lorenco daugiklio).



25.11 pav. **Judančios dalelės masė auga taip pat kaip Lorenco daugiklis. Greičiui viršijus 95% šviesos greičio, ji labai staigiai šauna į begalybę**

Žr. 8 ir 9 klausimus. ■

Paprastas reliatyvistinės masės formulės įrodymas yra pateiktas išplėstiniame intarpe 568 p.

Reliatyvistinės masės reikšmė

Masė, kurią dalelė įgyja dėl savo judėjimo, yra tokia pat reali, kaip ir jos „įprastoji" masė. Jėga, reikalinga tai masei suteikti pagreitį, auga tiksliai pagal Niutono dėsnį, o gravitacinis jos poveikis – tiksliai pagal visuotinės traukos dėsnį.

Reliatyvistinė masės formulė (žr. išplėstinį intarpą 236 p.) paaiškina, kodėl joks kūnas, turintis masę, negali judėti greičiu, lygiu šviesos greičiui vakuume, o juo labiau – didesniu už jį. Pagreitinanti tokį kūną jėga suvartojama padidinti jo kinetinei energijai. Greičiui artėjant prie c, masė, o kartu ir kinetinė energija, labai išauga. Jei tokio kūno greitis pasiektų šviesos greitį, tai jo masė ir kinetinė energija turėtų būti begalinės, o tam pasiekti reikia begalinės jėgos arba baigtinės jėgos, be galo ilgai veikusios tą kūną.

?

F Įvertinkite, kokia būtų jūsų kūno masė, jei judėtumėte greičiu, lygiu 0,999c.

Turėdami omenyje, kad tokiu greičiu jūs iš tiesų judate kokios nors tolimos galaktikos atžvilgiu, paaiškinkite, kodėl iš tiesų nejaučiate šios didžiulės masės.

■ Žr. 10 ir 11 klausimus.

7 MASĖ IR ENERGIJA

Geriausiai žinoma ir viena trumpiausių fizikos formulių yra tokia:

$$E = mc^2$$

Paprastas šios lygties įrodymas pateiktas išplėstiniame intarpe 238 p. Nesuklyskite padarydami išvadą, kad Einšteino masės ir energijos sąryšis galioja tik didžiulių energijų dalelėms ir branduolinėms reakcijoms. Pabandykime panagrinėti, kaip ji gali būti pritaikyta, pavyzdžiui, šildant dujas ar skystį. Didžiausia energijos dalis tokiu atveju suvartojama tam, kad dujų ar skysčio molekulės greičiau judėtų, t. y. būtų „šiltesnės". Greičiau judėdamos, jos įgyja didesnę masę, kadangi

$$m = \gamma m_0$$

Vėstant kavai puodelyje, jos molekulės praranda energiją, taigi ir tos energijos masės ekvivalentą. *Bet koks kūno energijos padidėjimas reiškia ir jo masės padidėjimą.*

Atomo masė ir energija

Atomo masė susidaro iš jį sudarančių dalelių (nukleonų ir elektronų) rimties masių, taip pat masės pokyčio, sąlygojamo tų dalelių kinetinių ir potencinių energijų. Nukleonams judant branduolyje, o elektronams – aplink branduolį, kinetinė ir potencinė jų energijos nuolatos keičiasi, tačiau suma išlieka pastovi.

Kadangi dažniausiai aktualus yra energijos pokyčio sukeltas kūno masės pokytis, šią formulę patogiau pateikti tokiu pavidalu

$$\Delta E = \Delta mc^2$$

Šis sąryšis galioja tokiems procesams, kaip kuro degimas, kai galutinė degimo produktų masė visada yra mažesnė už pradinių degimo produktų masių sumą.

Masės pokytis normalios cheminės reakcijos metu yra visiškai nežymus. Paprastuose chemijos skaičiavimuose į jį nereikia atsižvelgti. Daugiau masės pavirsta energija branduolių reakcijų, tokių kaip dalijimasis ar sintezė, metu, tačiau netgi šiuo atveju egzistuoja suprantamos fizikinės priežastys, neleidžiančios visam prarandamos masės energijos ekvivalentui virsti, tarkime, kinetine energija. Galų gale, bet koks procesas užsibaigia kokia nors stabilia materijos forma, vėl sudaryta iš nukleonų, elektronų, neutrinų ir panašiai (išsamiau žr. 26 skyrių).

Reliatyvistinė masės formulė

Reliatyvistinė masės formulė išvedama remiantis vienu fundamentaliausių fizikos dėsnių – judesio kiekio tvermės dėsniu. Pritaikykime šį dėsnį paprastam, idealiai tampriajam (elastiškajam) dviejų vienodos masės kūnų, judančių vienodais greičiais priešpriešiais, susidūrimui aprašyti. Pilnas judesio kiekis tokio susidūrimo metu lygus nuliui, jis turi nesikeisti.

Įsivaizduokite, kad du žaidėjai, judantys dideliais greičiais, bando pataikyti vienas į kitą idealiai tampriais guminiais kamuoliais.

Tikėtinas tokio proceso scenarijus, žiūrint vieno žaidėjo (Pi) ir kito žaidėjo (Mu) akimis, pavaizduotas 25.12 pav. Jie juda vienas priešais kitą išilgai lygiagrečių tiesių dideliu santykiniu greičiu v. Kadangi jie yra kosmose, jokios kitos jėgos jų neveikia, ir jie neturi jokios absoliučios atskaitos sistemos, kurios atžvilgiu galėtų nuspręsti apie savo judėjimo pobūdį. Tarkime, šalia esantis teisėjas vis tik stebi jų veiksmus.

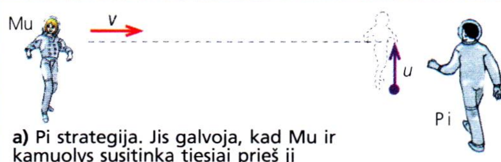
25.12a) pav. parodyta, kad Pi meta savo kamuolį statmena savo judėjimui kryptimi, numatęs, kad kamuolys skrietų būtent tiek laiko, kiek užtruks Mu iki pasieks susidūrimo tašką. Aišku, norėdamas išvengti per stipraus smūgio, jis meta savo kamuolį greičiu u, gerokai mažesniu už v.

(Reikia pažymėti, kad mūsų nagrinėjime yra šiek tiek netikslumų: jei Pi ir Mu judėtų tiesiai vienas į kitą, jie neišvengtų susidūrimo! Taigi leiskime jiems judėti tiesėmis, kurios nesusikerta, o praeina labai arti viena nuo kitos. Kadangi v yra daug didesnis už u, šis nukrypimas nereikalauja patikslinimų matematinėse formulėse.)

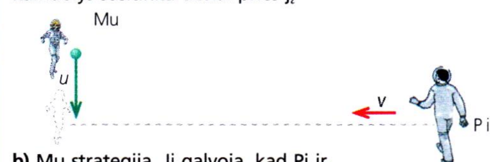
Mu atrodo (25.12b) pav.), kad ji taip pat turi išmesti kamuolį statmenai savo judėjimo krypčiai tokiu pat greičiu u ir būtent reikiamu metu, kad jis atsidurtų tam tikrame Pi judėjimo trajektorijos taške būtent tuo metu, kai tame taške atsiduria pats Pi. Taigi vaizdas yra visiškai simetriškas.

Tačiau teisėjas mato, kad nei vienas, nei kitas kamuolys nepasieks priešininko; jie susidurs pusiaukelėje ir atšoks vienas nuo kito, kaip parodyta paveiksle c).

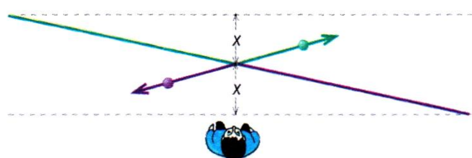
Ar abu žaidėjai išmetė kamuolius vienu metu? Taip, atsako teisėjas. Ne, teigia abu žaidėjai. Pi sako, kad Mu metė kamuolį anksčiau negu jis, o Mu teigia



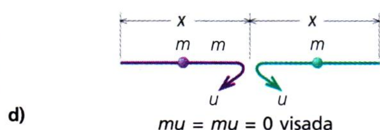
a) Pi strategija. Jis galvoja, kad Mu ir kamuolys susitinka tiesiai prieš jį



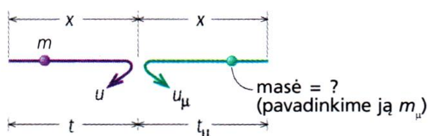
b) Mu strategija. Ji galvoja, kad Pi ir kamuolys susitinka tiesiai prieš ją



c) Teisėjas mato: atsitiktinai kamuoliai susiduria pusiaukelėje ir atšoka vienas nuo kito



d)



e) Pi požiūris

Pi atrodo, kad Mu viską daro lėčiau nei jis, nes bet kokiam laiko intervalui tarp kamuolio išmetimo ir susidūrimo

$$t_\mu = \gamma t \qquad [1]$$

Pagal judesio kiekio tvermės dėsnį:

$$m_\mu u_\mu = -mu \text{ arba } \frac{m_\mu}{m} = \frac{u}{u_\mu} \qquad [2]$$

Taip pat: $$u_\mu = -\frac{\text{atstumas } (x/2)}{t_\mu}$$

ir $$u = \frac{\text{tas pats atstumas } (x/2)}{t}$$

Taigi: $$\frac{u}{u_\mu} = \frac{t_\mu}{t} = \frac{\gamma t}{t} = \gamma \text{ (iš [1] lygties)}$$

Todėl [2] lygtis įgauna pavidalą:

$$\frac{m_\mu}{m} = \gamma$$

Arba: $$m_\mu = \gamma m$$

Dar galima užrašyti taip:

$$m = \gamma m_0$$

25.12 pav. **Brėžiniai, iliustruojantys formulės $m = \gamma m_0$ įrodymą**

buvus atvirkščiai. Sutikime su Pi ir patikrinkime, kodėl jam taip atrodo.

Pi mato, kad Mu juda beveik tiesiai į jį dideliu greičiu v. Dar kartą prisiminkime, kad kamuolio greitis u yra daug mažesnis už žaidėjų greitį v. Pi taip pat suvokia, kad dėl laiko sulėtėjimo daugiklio γ bet koks laiko tarpas, susijęs su Mu, yra *ilgesnis*, nei lygiai toks pat laikas, išmatuotas jo paties atskaitos sistemoje. Tačiau kamuoliai vis tik susiduria! Tas akivaizdus faktas jam gali būti suprantamas tik tuo atveju, jei Mu sviestas kamuolys skriejo *ilgesnį* laiką, nei jo paties mestas, nes – akivaizdu – jei jie susiduria, reiškia, abu tuo pat metu yra tame pačiame taške. Jei Pi sviestas kamuolys skriejo t sekundžių, tai Mu sviestasis turėjo užtrukti kelyje

$$t_\mu = \gamma t$$

sekundžių. 25.12c) pav. matyti, kad abu kamuoliai *į šoną* nuskrieja atstumą x. Su tuo turi sutikti abu žaidėjai, nes atstumai sutrumpėja *tik jų judėjimo*, o ne statmena jai, kryptimi.

Taigi Pi pagrįstai gali nutarti, kad Mu sviestas kamuolys į susidūrimo tašką judėjo lėčiau, nes jis nuskriejo *tą patį atstumą* (x) per *ilgesnį laiką*. Taip pat jis gali nuspręsti, kad šonine kryptimi Mu kamuolys skriejo greičiu

$$u_\mu = u/\gamma$$

Judesio kiekis turi nepakisti!

25.12c) pav. parodyta, kaip visa tai mato teisėjas, stebintis iš šalies. Sviediniai, kurių masės yra vienodos, o greičiai taip pat vienodi, bet nukreipti priešingomis kryptimis, susiduria ir nuskrieja į priešingas puses. Judesio kiekis tenkina tvermės dėsnį, taigi jis turi būti lygus nuliui ir prieš, ir po susidūrimo (d).

Pi viskas atrodo kiek kitaip (e). Jo kamuolys atskrieja į susidūrimo tašką didesniu greičiu nei Mu sviestasis, todėl abiejų kamuolių judesio kiekių suma nėra lygi nuliui. Paaiškinti galima tik vienu būdu: kiek kartų sumažėja kamuolio greitis, tiek kartų turi padidėti jo masė – tik tokiu atveju pilnasis judesio kiekis išliks nepakitęs. Taigi:

$$m_\mu = \gamma m$$

Čia m_μ yra kamuolio masė Pi atskaitos sistemoje, kai tuo tarpu jo masė Mu atskaitos sistemoje lygi m, nes toje sistemoje jo greitis yra u, t. y. daug mažesnis už v.

Jeigu panagrinėtume, kaip visas procesas atrodo Mu, gautume visiškai analogišką vaizdą, tik jos ir Pi sprendimai būtų susikeitę vietomis.

Taigi visais atvejais problema sprendžiama sąryšį formuluojant tokiu būdu:

Kūno, judančio stebėtojo atžvilgiu greičiu v, reliatyvistinė masė m = jo rimties masė m_0 × Lorenco daugiklis.

Arba:
$$m = m_0\gamma = \frac{m_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

Rimties masė yra masė objekto, judančio *stebėtojo atžvilgiu* greičiu, lygiu nuliui. Stebėtojo atskaitos sistemoje ji yra pastovi.

Masė dalelės, kurios rimties masė lygi nuliui

Fotono rimties masė lygi nuliui, tačiau jis turi energiją E ir todėl ją atitinkanti reliatyvistinė masė gali būti apibrėžiama formule:

$$m = E/c^2$$

Fotono judesio kiekis

Masę padauginę iš greičio gauname judesio kiekį; tai galioja ir fotonui:

$$p = mc = E/c$$

Vėl de Broilio sąryšis

Kita vertus, fotono energija apibrėžiama formule:

$$E = hf$$

Kur h yra Planko konstanta, o f – spinduliuotės dažnis. Energiją galima išreikšti ir šviesos bangos ilgiu:

$$E = hf = hc/\lambda$$

Dabar, pasinaudodami tuo, kad fotono judesio kiekis p lygus E/c, gauname:

$$p = \frac{E}{c} = \frac{hc}{c\lambda} = \frac{h}{\lambda}$$

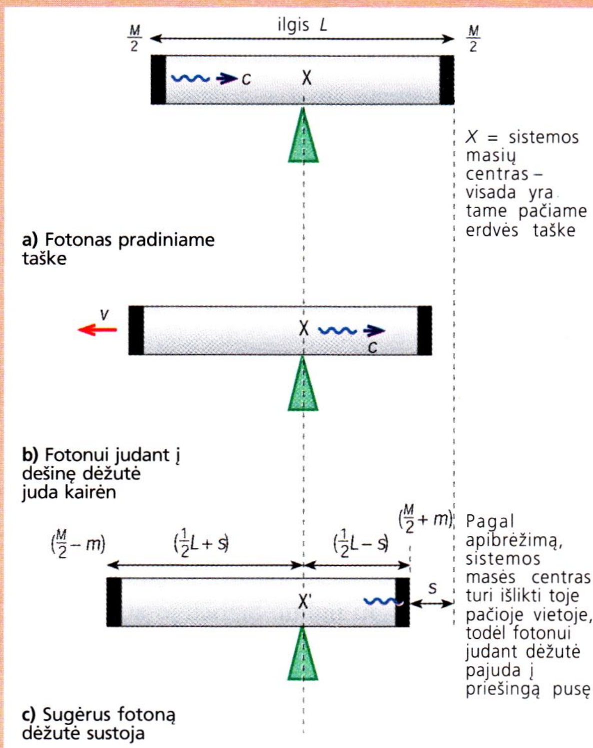
Tai yra de Broilio sąryšis, kurį nagrinėjome 36 p., aptardami elektronų bangas.

?

G Kuris iš fotonų – raudonasis ar mėlynasis – bus veikiamas didesne jėga gravitaciniame lauke? Ar skirsis dėl to jų judėjimas? Paaiškinkite gautą atsakymą.

Įrodymas, kad $E = mc^2$

25.13 pav. parodyta eksperimento, kurį dabar aptarsime, schema. Tarkime, turime uždarą labai mažos masės dėžutę ar vamzdelį su galuose pritvirtintomis dviem vienodomis masėmis. Panagrinėkime, kas atsitiks, kai fotonas bus išspinduliuojamas kairiajame dėžutės gale, kaip parodyta 25.13a) pav., o po to sugeriamas dešiniajame jos gale. Šis procesas yra masės, energijos ir judesio kiekio pernešimas iš dėžutės kairės pusės į dešinę.



25.13 pav. **Fotonai turi energiją ir masę – jų priklausomybė $E = mc^2$**

Tarkime, stebime dėžutę iš šalies ir norime nuspėti, kas su ja atsitiks. Pirmiausia pagalvokime, kaip mes galėtume, remdamiesi stebėjimais, *sužinoti*, kad fotonas tikrai buvo išspinduliuotas ir po to sugertas?

Akivaizdu, kad jei fotonas neša mūsų apibrėžtą judesio kiekį, tai dėl suminio (dėžutės ir fotono) judesio kiekio tvermės fotonui judant į dešinę, dėžutė turi pasistūmėti kairėn. Fotonui pasiekus dešinįjį dėžutės galą, jis sustoja, nes yra sugeriamas, ir dėžutė taip pat turi nustoti judėti.

Pabandykime apskaičiuoti šį reiškinį:

Tegul dėžutės ilgis yra L, o jos masė, vienodomis dalimis išdėstyta galuose, lygi M. Fotono ekvivalentinė masė yra m, jo greitis c, o judesio kiekis – p.

Galima išreikšti $m = E/c^2$ ir nustatyti, kad fotono judesio kiekis p lygus $mc = E/c$.

Judesio kiekio tvermės dėsnis judant fotonui gali būti užrašytas taip:

dėžutės, judančios į kairę greičiu v, judesio kiekis = fotono judesio kiekiui p

Tai reiškia: $(M - m)v = E/c$

Kadangi m yra daug mažesnis už M, kairėje lygybės pusėje galima jo nepaisyti ir formulę supaprastintai užrašyti taip: $Mv = E/c$

Vadinasi, dėžutės greitis lygus

$$v = E/Mc$$

Fotonas pasiekia dešinįjį dėžutės galą po laiko

$$t = L/c$$

Per šį laiką dėžutė, judėdama greičiu v, pasistūmės į kairę atstumu

$$s = vt$$

Įrašę reikšmes gauname: $s = Et/Mc = EL/Mc^2$

8 RELIATYVUMO TEORIJA PAAIŠKINA MAGNETIZMĄ

Srovės, arba judančio krūvio, sukuriamas magnetinis laukas pasireiškia jėgomis, veikiančiomis kitus krūvius. Šios jėgos atsiranda dėl krūvininkų, tokių kaip elektronai, judančių laiduose, ir kitų elektronų, esančių kokiame nors detektoriuje, *tarpusavio* judėjimo. Magnetinės jėgos kyla dėl *reliatyvistinio laiko sulėtėjimo*.

Prisiminkime pritvirtintą prie spyruoklės masę (25.14 pav.). Pajudinta iš pusiausvyros padėties ji ima virpėti; svyravimų periodas išreiškiamas taip:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{M}{k}}$$

Kur k yra spyruoklės konstanta (jėga vienetiniam pailgėjimui).

Kai tokia spyruoklė juda greičiu v, periodas T pakinta, nes turi būti padaugintas iš įprasto sulėtėjimo daugiklio γ. Iš tiesų taip gali atsitikti

Dabar pritaikysime **judesio kiekio tvermės dėsnį**. Kadangi dėžutė visiškai izoliuota, jos masių centras iš pradžių yra padėtyje X, kaip parodyta 25.13a) pav. Fotonui judant iš kairės į dešinę, masių pasiskirstymas pakinta, ir naujoji masės centro padėtis tampa X' (c). *Tačiau dėl judesio kiekio tvermės dėsnio sistemos masių centras judėti negali, todėl padėtys X' ir X turi sutapti.* Kad sistemos masių centro padėtis nepakistų, dėžutė turi pasistūmėti į kairę.

Procesas, kurį dabar nagrinėjame, yra labai svarbus. Verta apie jį susimąstyti. Jei sistema yra visiškai izoliuota, tai jokie jos viduje vykstantys procesai negali pakeisti jos masių centro padėties. Pritaikykime šią išvadą judesio kiekio tvermės dėsniui. Imdami judesio kiekio momentus nejudančio masių centro atžvilgiu, gauname:

Kairiosios pusės judesio kiekis = dešiniosios pusės judesio kiekis

$$(\tfrac{1}{2}M - m)(\tfrac{1}{2}L + s) = (\tfrac{1}{2}M + m)(\tfrac{1}{2}L - s)$$

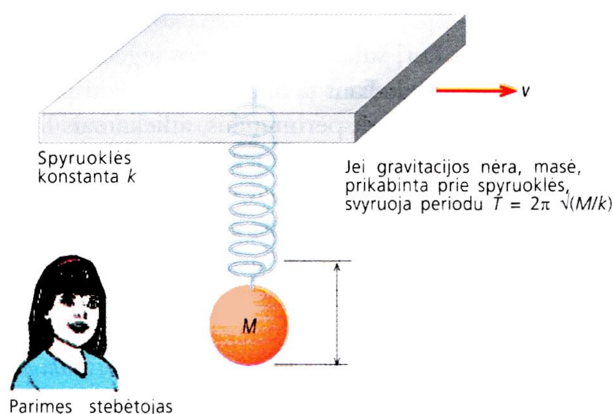
Suprastinę gauname:

$$m = Ms/L$$

Kadangi $s = EL/Mc^2$, galutinai gauname: $m = E/c^2$
Taigi ir šis eksperimentas patvirtina, kad masė, atitinkanti energiją E, lygi E/c^2.

Komentaras

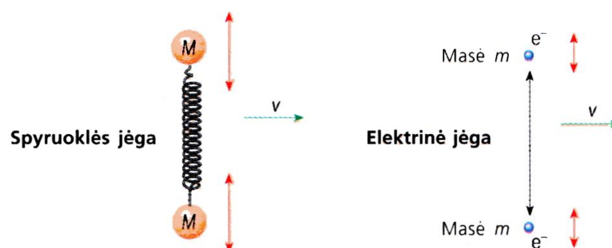
Mūsų nagrinėjimas turi akivaizdžių trūkumų. Pirmiausia nerealu, jog dėžutė galėtų būti tokia stangri, kad pajudėtų iš karto išspinduliavus fotoną ir suspėtų pasistūmėti per tą laiką, kol fotonas pro ją praskrieja. Antra, įrodėme, kad $E = mc^2$ tik fotonui, t. y. dalelei, kurios rimties masė lygi nuliui. Reikėtų įsitikinti, ar šis sąryšis tinka ir bet kokiam materialiam kūnui.



25.14 pav. **Virpamosios sistemos stebėjimas. Sistemai judant greičiu *v*, *T* išauga: *M* padidėja, o *k* sumažėja**

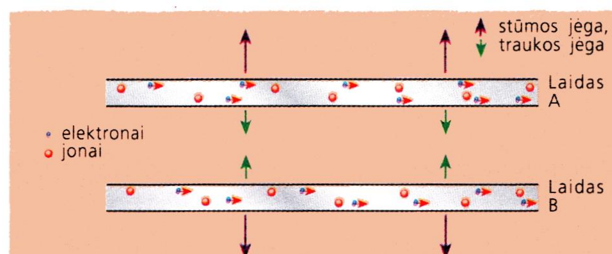
tik tada, kai judant spyruoklei su svareliu arba M padidėja, arba k sumažėja. Pasitelkus sudėtingesnius matematinius išvedžiojimus galima įsitikinti, kad tuo pat metu pasireiškia abu reiškiniai; pokyčiai abiem atvejais yra proporcingi $(v/c)^2$.

Jėgą kol kas įsivaizdavome kaip spyruoklės sukeltą, tačiau ji gali būti ir kitokios prigimties, kaip 25.15 pav.



25.15 pav. **Elektronų pora, panašiai kaip masės, pritvirtintos spyruoklės galuose, irgi gali virpėti. Judant stacionaraus stebėtojo atžvilgiu svyravimų periodas auga, nes *M* padidėja, o jėga mažėja. Elektrinė jėga mažėja visomis kryptimis**

Dabar panagrinėkime du laidus, kuriuose elektronai gali beveik laisvai judėti parimusių teigiamo krūvio jonų atžvilgiu (25.16 pav.). Kol srovė laidais neteka, suminės jų sąveikos jėgos lygios nuliui, nes priešingų krūvių traukos jėgos atsveria vienodo ženklo krūvių stūmos jėgas.



Yra dvi poros traukos ir dvi poros stūmos jėgų:
Traukos: 1. tarp elektronų, esančių A ir jonų, esančių B
2. tarp elektronų, esančių B ir jonų, esančių A
Stūmos: 3. tarp jonų, esančių A ir jonų, esančių B
4. tarp elektronų, esančių A ir elektronų, esančių B
Kol srovės nėra, visos jėgos yra lygios ir atsveria vienos kitas.
Judant elektronams ir atsiradus srovei, 4 jėga sumažėja. Atsiradusi tokiu atveju laidų sąveikos jėga yra elektromagnetinės prigimties.

25.16 pav. **Magnetizmas yra reliatyvumo pasireiškimas**

Pradėjus tekėti laidais srovei, elektronai pradeda greičiu v judėti parimusių jonų atžvilgiu. Kaip matėme, tokiu atveju M padidėja, o sąveikos jėga sumažėja. Tai reiškia, kad elektronų stūmos jėga susilpnėja ir suminė traukos jėga viršija stūmos jėgą. Laidai pradeda sąveikauti. Šis efektas vadinamas **elektromagnetizmu**.

9 KITI RELIATYVUMO PASIREIŠKIMAI

Reliatyvistinis judesio kiekis

Judančio kūno judesio kiekis apibrėžiamas kaip $p = m_0 v$. Jeigu v yra labai didelis, reikia atsižvelgti ir į masės padidėjimą, t. y. rašyti, kad:

$$\text{Judesio kiekis } p = \gamma m_0 v$$

Pilnoji judančios masės energija

Darbas, kuris atliekamas greitinant kūną, pavirsta jo kinetine energija. Kai greičiai daug mažesni už c, kinetinė energija lygi $E_K = ½mv^2$. Greičiui didėjant tenka atsižvelgti ir į masės augimą, todėl kinetinė energija tampa lygi

$$E_K = \gamma m_0 c^2 - m_0 c^2$$

kur m_0 yra kūno rimties masė. Pertvarkę reiškinį gauname:

$$\gamma m_0 c^2 = E_K + m_0 c^2$$

Dydis $\gamma m_0 c^2$ yra pilnoji judančio kūno energija E, susidedanti iš jo rimties energijos $m_0 c^2$ ir kinetinės energijos sumos.

Žr. 18 klausimą 26 skyriaus pabaigoje, kur pateiktas paprastas šios formulės įrodymas.

Judesio kiekio ir energijos sąryšis

Daugeliu atvejų, ypač dalelių fizikoje, judesio kiekis dėl savo tenkinamo tvermės dėsnio yra priimtinesnis už greitį, todėl daugiausia naudojamas pilnosios energijos ir judesio kiekio sąryšis:

$$E^2 = p^2 c^2 + (m_0 c^2)^2$$

26 skyriuje pateiksime pavyzdžių, kaip panaudojamas šis sąryšis.

Kai greičiai labai dideli, tarkime, lygūs ar didesni kaip $0{,}999c$, rimties energija tampa žymiai mažesnė už kinetinę energiją, todėl apytiksliai

$$E = pc$$

Taigi gavome tą patį sąryšį, kuris galioja fotonui (p. 237).

10 BENDRASIS RELIATYVUMAS

Erdvėlaikis valdo mases, nurodydamas, kaip jos turi judėti; masės valdo erdvėlaikį, nurodydamos, kaip jis turi išlinkti.

Šis vienintelis sakinys išreiškia bendrosios reliatyvumo teorijos esmę. Einšteinas kadaise apie tai susimąstė, įsivaizduodamas besąs uždaroje dėžėje, tarkime, lifte. Aišku, būdamas lifte jis kojomis remiasi į grindis, t. y. jaučia „svorio“ jėgą. Jeigu jis paleistų iš rankų pieštuką, tas kristų žemyn su pastoviu pagreičiu.

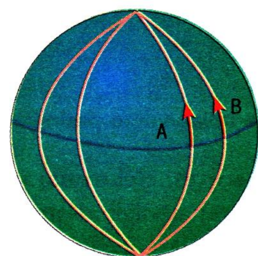
Kita vertus, tokį pat poveikį, kurį sukelia gravitacijos jėgos, galima sukelti ir neveikiant gravitacijai, tik keliant tą liftą aukštyn tokiu pat, t. y. laisvojo kritimo, pagreičiu. Jokiais eksperimentais, atliekamais lifto viduje, negalima patikrinti, kuris būtent „svorio“ jėgos sukėlimo mechanizmas veikia! Naudodamasis šių reiškinių ekvivalentumu, *specialiąja reliatyvumo teorija* ir aukštąja geometrija, kurios jį išmokė mokytojas Hermanas Minkowskis, A. Einšteinas sukūrė *bendrąją reliatyvumo teoriją*, kuri gali būti pritaikoma netgi aprašant Visatą.

Pirmiausia Einšteinas atmetė gravitaciją kaip jėgą, veikiančią visoje erdvėje ir pakeitė ją geometrija, įvesdamas kartu *erdvėlaikio išlinkimo* sąvoką. Jų analogija parodyta 25.17 pav. Įsivaizduokite du pilotus, skriejančius vienodais greičiais lėktuvais tiesiai į Šiaurės polių iš dviejų skirtingų pusiaujo taškų. Abu jie juda tiesiomis linijomis, bet artėda-

Keliautojai pradeda judėti lygiagrečiomis tiesėmis

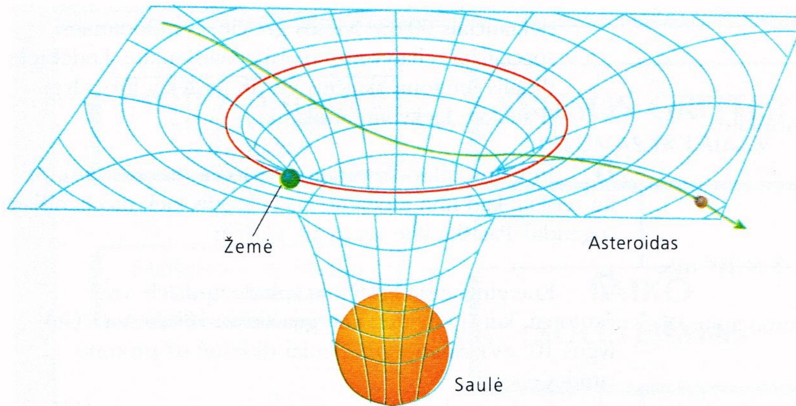
A B

... bet susitinka taške N



25.17 pav.
Klausimas: Kokia paslaptinga jėga suartina A ir B?
Atsakymas: Tai jokia jėga – tai tik geometrija

mi prie poliaus neišvengiamai artėja vienas prie kito, o pačiame poliuje gali ir susidurti. Kokia paslaptinga jėga traukia juos vieną prie kito? Ne, jokios jėgos nėra. Taip atsitinka dėl to, kad Žemė yra sferos pavidalo ir jos paviršius yra kreivas.

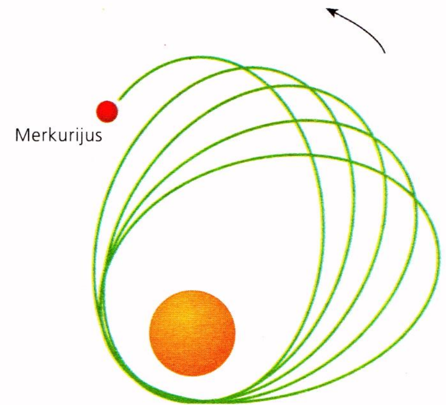


25.18 pav. **Erdvėlaikis yra išlinkęs.... Klausimas: Kokia paslaptinga jėga nukreipia asteroidą į Saulę? Niutono atsakymas: Gravitacijos, bet aš negaliu paaiškinti jos prigimties. Einšteino atsakymas: Jokių jėgų nereikia. Viską galima paaiškinti remiantis masių pasiskirstymo ir erdvės geometrijos sąryšiu, nors erdvėlaikio išlinkimo priežastys irgi nėra aiškios.**

Einšteinas įrodė, kad bet koks masyvus kūnas iškreipia apie save erdvėlaikį. Dvi judančios netoli viena kitos masės, tokios kaip Žemė ir Mėnulis, „erdvėlaikyje juda išilgai tiesių“, *bet mes matome juos judančius kreivėmis*. Žemės masė didesnė, todėl ir erdvėlaikis apie ją labiau iškreiptas. Abu kūnai sukasi apie tą patį tašką, bet Mėnulis juda didesne, mažiau iškreipta orbita.

Teorija, paremta geometrija, planetų orbitas nusako tiksliau negu Niutono gravitacijos teorija. Merkurijaus eliptinė orbita sukasi apie Saulę taip, kad teisingai gali būti aprašyta tik naudojant Einšteino teoriją (25.19 pav.).

Bendroji reliatyvumo teorija yra šiolaikinės kosmologijos pagrindas.



25.19 pav. **Merkurijaus orbita sukasi („precesuoja“) apie Saulę. Niutono teorija nuspėjo šią precesiją, bet nurodė neteisingą periodo reikšmę. Einšteino teorija duoda teisingą precesijos periodą**

SANTRAUKA

Šiame skyriuje jūs sužinojote, kaip paprastas principas, teigiantis, kad **šviesos greitis vakuume yra toks pat visiems stebėtojams, judantiems vienas kito atžvilgiu pastoviais greičiais**, sąlygoja labai svarbias išvadas apie laiko, erdvės (atstumų), masės ir energijos prigimtį ir savybes. Išstudijavę šią teoriją jūs galite:

- Suprasti Maikelsono ir Morlio eksperimento esmę ir jo neigiamo rezultato svarbą.
- Sužinoti dvi Einšteino specialiosios reliatyvumo teorijos hipotezes, kuriomis remiantis buvo paaiškintas neigiamas Maikelsono ir Morlio eksperimento rezultatas.
- Suprasti atskaitos sistemos koncepciją.
- Suprasti, kaip iš Einšteino hipotezių seka Lorenco daugiklis.
- Suprasti ir gebėti pasinaudoti formulėmis, išreiškiančiomis Lorenco daugiklio poveikį laikui, atstumui ir masei:

$$t' = \gamma t \quad x' = \gamma x \quad m = \gamma m_0$$

- Suprasti masės ir energijos ekvivalentumą ir formulę $E = mc^2$.
- Sužinoti apie reliatyvistinę energiją ir jos sąryšį su judesio kiekiu, išreiškiamą formulėmis:

$$E = \gamma m_0 c^2 = E_K + m_0 c$$
$$E^2 = p^2 c^2 + (m_0 c^2)^2$$

KLAUSIMAI

Esant greičiams, artimiems šviesos greičiui, naudokitės išraiška:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Kai greičiai daug mažesni už šviesos greitį, vartokite apytikslę išraišką:

$$\gamma = 1 + \frac{v^2}{2c^2}$$

Kai reikia, naudokitės šviesos greičio verte $c = 3 \times 10^8$ m/s.

1 Paaiškinkite, kodėl fundamentalusis atstumo apibrėžimas būtinai remiasi laiko sąvoka.

2 Tolimas kvazaras juda tolyn nuo mūsų greičiu, lygiu pusei šviesos greičio

a) Kokiu greičiu pasiekia mus iš to kvazaro sklindanti šviesa?

b) Kaip santykinis Žemės ir kvazaro judėjimas gali pakeisti šią šviesą?

3

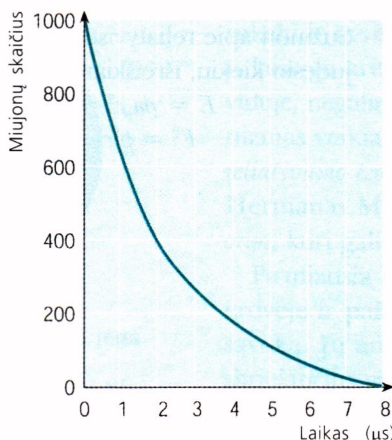
a) Kokiu greičiu turi judėti laikrodis, kad parimusio laikrodžio atžvilgiu jis eitų du kartus lėčiau?

b) Kokio ilgio bus metro ilgio liniuotė **(i)** stebėtojui, judančiam šiuo greičiu, **(ii)** parimusiam stebėtojui?

4 Prieš pirmąjį klausimą yra pateiktos dvi Lorenco daugiklio γ išraiškos. Kokia paklaida gaunama naudojant apytikslę išraišką atveju, kai greitis v lygus 0,2 c?

5 Kosminiams spinduliams susidūrus su atomais, esančiais aukštuosiuose atmosferos sluoksniuose, gali atsirasti įvairios dalelės, tarp jų – ir miujonai. Miujonas yra nestabili dalelė, skylanti į elektroną ir du neutrinus. 25.K5 pav. parodyta, kaip miujonų skaičius N kinta bėgant laikui t.
Kiekvienam 1000 miujonų, registruojamų 2000 m aukštyje, jūros lygyje registruojami 700.

a) Naudodamiesi grafiku raskite, kiek laiko trunka 1000 miujonų skaičiaus sumažėjimas iki 700?



25.K5 pav.

b) Kokį atstumą atmosferoje per šį laiką gali nuskrieti fotonas?

c) Kosminių spindulių sužadinti miujonai juda greičiais, siekiančiais 99,8% šviesos greičio. Naudodamiesi specialiąja reliatyvumo teorija paaiškinkite, kodėl toks didelis miujonų skaičius vis tik pasiekia jūros lygį. (Pateikite kiekybinį atsakymą.)

6 Judantis laikrodis visada eina lėčiau už parimusį. Ar tai reiškia, kad nuo judėjimo tas laikrodis kiek mechaniškai sugenda? Paaiškinkite atsakymą plačiau.

7 Energingiausia kosminių spindulių dalelė yra protonai, kurių kinetinė energija siekia 10^{10} GeV (1 GeV lygus 10^9 eV). Ši energija žymiai didesnė už protono rimties energiją.

a) Įrodykite, kad tokio protono γ vertė yra apie 10^{10}.

b) Užrašykite šio protono greitį vieno ženklo po kablelio tikslumu.

c) Mūsų galaktikos diametras yra 10^5 šviesmečių. Kokio pločio ji yra šio protono požiūriu?

d) Kiek laiko trunka šiam protonui praskrieti pro mūsų galaktiką **(i)** mūsų atskaitos sistemoje **(ii)** paties protono atskaitos sistemoje?

8 Judančio objekto tankis padidėja dėl dviejų priežasčių. Kokios tos priežastys?

9 Elektrono rimties masė lygi $9{,}11 \times 10^{-31}$ kg. Apskaičiuokite:

a) jo reliatyvistinę masę,

b) elektrono, judančio 0,9c greičiu, judesio kiekį.

10 Pateikite fizikines priežastis, dėl kurių kūnas, turintis nelygią nuliui rimties masę, negali judėti šviesos greičiu.

11 Elektronai, judantys televizoriaus kineskopo viduje, pagreitinami maždaug 25 kV potencialų skirtumo.

a) Kokio dydžio (džauliais) darbas atliekamas juos pagreitinant?

b) Kokią kinetinę energiją įgyja toks elektronas?

c) Leistini nuokrypiai veikiant kineskopui sudaro 0,2 procento. Ar konstruojant kineskopą reikia atsižvelgti į reliatyvistinius efektus? Jei taip, kokia prasme kineskopas yra jautriausias šiuo požiūriu?

12 Pilnoji energija kūno, kurio rimties masė lygi m_0, pateikiama formule $E = \gamma m_0 c^2$. Pilnoji energija lygi rimties energijos ir kinetinės energijos sumai. Nustatykite **(i)** pilnąją energiją ir **(ii)** kinetinę energiją:

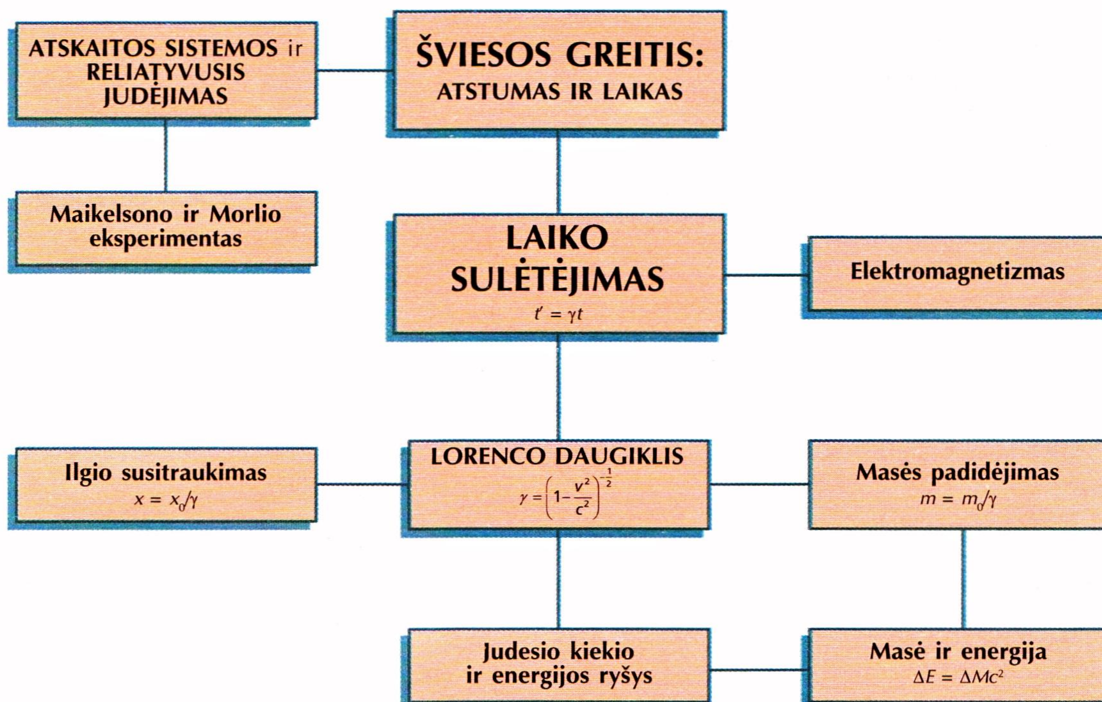
a) protono, judančio 0,995c greičiu,

b) elektrono, judančio tuo pačiu greičiu.

Pakomentuokite rimties masės ir kinetinės energijos santykį pirmuoju ir antruoju atveju. (Protono rimties masė lygi $1{,}67 \times 10^{-27}$ kg, elektrono rimties masė – $9{,}11 \times 10^{-31}$ kg.)

ERDVĖLAIKIO FIZIKA

Šiame skyriuje pateikta nemažai sąvokų, kurias suprasti nėra lengva. Kad būtų lengviau rasti neaiškias sąvokas ir jų tarpusavio ryšius, pasinaudokite šia skyriaus schema.



26 Giliausieji materijos klodai

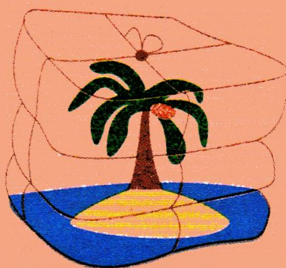
Mano žodis vaikams

Vaikai! Jeigu susimąstysite, koks puikus, didingas, koks begalinis ir neaprėpiamas tas vienintelis mūsų pasaulis, kuriame gyvename, pagalvokite apie tokį dalyką.

Stogo plokštė dengia žalius ir raudonus taškučius, po jais driekiasi rusvai gelsvi tinklai, pilni juodų domino kauliukų. Dar žemiau dailiai supakuotas ryšulys, kurį jums baisiai maga atrišti. Jo viduj maža salelė, joje auga didžiulis medis, jo viršūnėj kabo vaisius su kietu kevalu.

Perskelkite kevalą, nulupkite žievelę ir rasite branduolį – jame vėl išvysite stogą, dengiamą žalių ir raudonų taškelių, o virš jų rusvai gelsvus tinklus, pilnus juodų domino kauliukų, ir galų gale vėl tokį pat dailiai supakuotą ryšulį...





Vaikai, neatriškite virvutės! Tas, kas drįs išvynioti ryšulį, pats atsidurs jo viduje: toj salelėj, tame medy, tame vaisiuj, po tuo stogu, kuris gaubs tuos raudonus ir žalius taškučius, dar žemiau bus tie rusvai gelsvi tinklai su daugybe juodų domino kauliukų, o ant kelių jums gulės vėl toks pat dailiai supakuotas ryšulys.

Ir jei vis dėlto susimąstysite, koks puikus, didingas, begalinis, vienintelis ir nepakartojamas pasaulis, kuriame gyvenate, kiek jame visko daug ir kiek mažai, – tada atriškite pakuotę.

Robertas Greivsas (*R. Graves*, 1895–1985)

BUVO METAS, KAI MOKSLININKAI manė, kad atomai yra smulkiausios nedalomos dalelės – netgi pats žodis „atomos" graikų kalba reiškia „nedalus". Nuodugniau patyrinėję jie atrado elektronus, protonus ir neutronus. Tada vėl manė, kad tai jau mažiausios dalelės, tačiau dabar yra žinomos dar mažesnės.
Kur baigiasi ši seka, ar kada nors sužinosime, kad jau atrastos tikrai fundamentalios dalelės? Tai klausimai, į kuriuos atsakymų nežinome ir šiandien.

Keistasis elementariųjų dalelių pasaulis

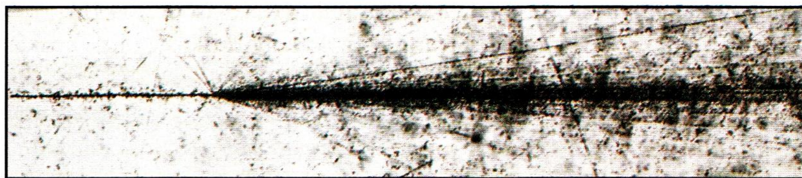
Pradėdami pažintį su subatominėmis dalelėmis jūs įžengsite į tikrai keistą pasaulį. Tai, kas supa mus kasdieniame gyvenime, yra *stabilioji* materija.

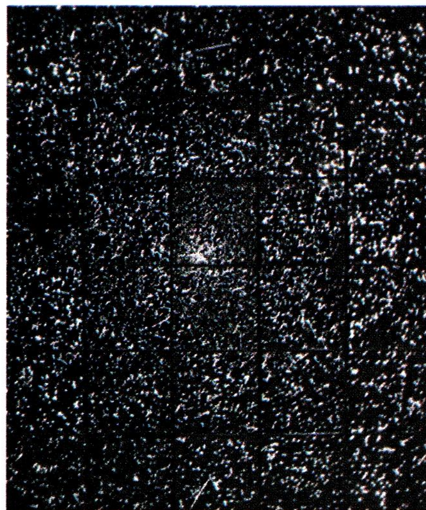
Teorija, paaiškinanti stabiliosios materijos pasaulį, vadinama **standartiniu modeliu**. Pagal šį modelį prieš maždaug 15 milijardų metų atsirado „singuliarumas", t. y. itin nestabilus taškas, nuo kurio ir prasidėjo Visata. Laikas ir erdvė pradėjo vystytis tik po **Didžiojo sprogimo**. 28 skyriuje išsamiau susipažinsime su šiuo Visatos materijos raidos etapu.

Šiuolaikiniai elementariųjų dalelių tyrinėtojai naudojasi labai galingais **dalelių greitintuvais**, esančiais didžiulėse nacionalinėse arba netgi tarptautinėse laboratorijose, tokiose kaip CERN (prancūzų k. *Centre Européen de Recherche Nucléaire*).

Vis tik Žemėje aptinkamos didžiausių energijų dalelės yra ne tuose greitintuvuose sukuriamos, o atskriejančios su kosminiais spinduliais.

26.1a) pav. **Kairėje: Labai didelės energijos geležies branduolys, atskriejęs iš kosmoso ir susidūręs su sidabro arba bromo branduoliu, esančiu fotografinėje emulsijoje, sukuria visą pluoštą dalelių – iš viso maždaug 850 mezonų**





26.1b) pav. **Kosminių spindulių dalelė, judanti greičiu, artimu šviesos greičiui, susiduria su kokio nors atmosferos sudėtyje esančio elemento branduoliu. Jos kinetinė energija atiduodama naujoms dalelėms. Šios susidurdamos „pagimdo" vėl kitas daleles, ir taip toliau – galiausiai pratrūksta „kosminių spindulių liūtis", turinti apie 2 × 10^5 dalelių. Liūties centrinė dalis matoma kaip 5m × 7m dydžio sritis iškrovos kameroje**

Daugiausia tai protonai, kurie sprogstančių žvaigždžių magnetiniuose laukuose pagreitinami iki greičių, labai artimų šviesos greičiui.

Praktiniai elementariųjų dalelių taikymai kasdieniame gyvenime nėra tokie jau riboti, kaip kartais gali atrodyti. Pavyzdžiui, dalelių greitintuvai ir detektoriai plačiai naudojami medicinoje diagnozuoti ir gydyti kai kurioms ligoms (žr. 24 skyrių). Archeologai ir menotyrininkai tam tikromis priemonėmis gali nustatyti įvairių radinių amžių. Analogiški įrenginiai naudojami tiriant ir kuriant naujas medžiagas, naudojamas pramonėje ir buityje, tokias kaip superlaidininkai, puslaidininkiai ir televizoriaus ar kompiuterio vaizduoklio ekranų paviršiai.

KĄ TURĖTUMĖTE ŽINOTI DAR PRIEŠ PRADĖDAMI SKAITYTI ŠĮ SKYRIŲ

Atomo ir branduolio fizikos pagrindai yra išdėstyti 17 ir 18 skyriuose. Jūs turėtumėte žinoti bent jau tokias **atomo** savybes:

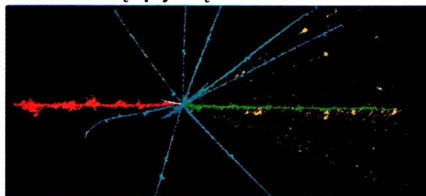
- Jo skersmuo yra maždaug 10^{-10} m ir jis yra sudarytas iš mažučio centre esančio **branduolio,** kurio skersmuo – tik kokie 10^{-14} m, apsupto „banginių dalelių debesėlio", kurį sudaro **elektronai.**
- Branduolyje sukaupta beveik visa atomo masė. Branduolį (išskyrus vandenilio, kuris yra tiesiog atskiras protonas) sudaro dviejų rūšių **nukleonai – protonai ir neutronai.** Protonai yra stabilūs, o neutronai, jei tik jie yra ne atome, skyla, kaip parodyta 26.2 pav. Šis skilimas kartais vyksta netgi ir branduoliuose, kurie turi neutronų perteklių.

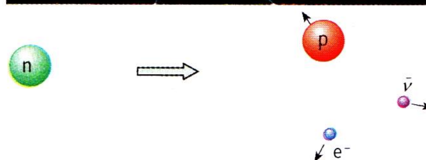
Iš 18 skyriaus taip pat turėtumėte prisiminti, kad norint suprasti, kas vyksta atomuose, reikalingos trijų rūšių jėgos:

- **Elektromagnetinė** jėga, suspaudžianti elektronus prie branduolio.
- **Stiprioji branduolinė** jėga, surišanti nukleonus į branduolį.
- Labai paslaptinga **silpnoji branduolinė** jėga, sukelianti įvairius kitokius reiškinius, tarp jų – beta skilimą (69 p.).

Šiame skyriuje aptiksite nemažai iki šiol negirdėtų dalykų. Pasistenkite kuo geriau juos suvokti, ir tik tada skaitykite tolimesnį tekstą. Ypač naudinga 26.15 lentelė, pateikta 262 puslapyje. Joje pateiktas visų aptariamų dalelių sąrašas ir jų savybės, ją įdėmiai išnagrinėję galėsite susidaryti gana aiškų vaizdą.

26.1c) pav. **Su kosminiais spinduliais atsklidęs sieros branduolys susiduria su fotografinėje emulsijoje esančiu branduoliu. Žaliai pažymėtas fluoro branduolys, mėlynai – kitos branduolių dalelės, geltonai – 16 susidūrimo metu susidariusių pijonų**





26.2 pav. **Neutronas yra stabilus tik branduolio viduje. Laisvieji neutronai skyla, to skilimo pusėjimo trukmė lygi 900 s. Skilimo metu galioja krūvio, judesio kiekio ir masės bei energijos tvermės dėsniai**

?

A Pasitelkite argumentų, paremiančių tokius teiginius:

a) elektromagnetinė jėga stipresnė už gravitacinę,

b) stiprioji jėga stipresnė už elektromagnetinę.

(Gali tekti pasinaudoti 18 skyriaus medžiaga.)

1 PAPRASTASIS ATOMAS TAMPA SUDĖTINGU

Paprastam Rezerfordo ir Boro atomo modeliui pakako trijų dalelių: neutrono, protono ir elektrono. Tačiau stebint beta dalelių, spinduliuojamų radioaktyviojo skilimo metu, energijų spektrus teko pasitelkti dar

vieną dalelę – **neutriną** – kurios judesio kiekis ir energija reikalingi paaiškinti šių spindulių prigimčiai, siekiant, kad šios reakcijos metu būtų išlaikyti atitinkami tvermės dėsniai. Tai labai maža, neturinti elektrinio krūvio dalelė, kurios masė labai artima nuliui (žr. 1-os d. 204 p.).

Kiek vėliau – 1930 metais – anglų fizikas teoretikas Polis Dirakas (*Paul Dirac*), matematiškai tyrinėjęs kvantinės mechanikos lygtis, pareiškė, kad kiekviena turinti elektros krūvį dalelė privalo turėti **antidalelę**, kurios masė yra tokia pat, o krūvis – priešingo ženklo. Taigi tokiu atveju turėtų egzistuoti ir teigiamo krūvio elektrono antidalelė. Ir iš tiesų, šis antielektronas, dabar vadinamas **pozitronu,** netrukus (1932 m.) buvo eksperimentiškai aptiktas.

Kita svarbi, vėlgi teoriškai surasta dalelė, buvo japono H. Jukavos (*Hideki Yukawa*) 1935 m. aptiktas **mezonas** (pavadinimas graikiškai reiškia „vidutinis"), t. y. dalelė, kurios masė mažesnė už nukleono, bet daug didesnė už elektrono masę. Iš tiesų eksperimentuotojai netrukus greitai aptiko du mezonus – vieną, nuspėtą Jukavos ir dabar vadinamą **pijonu** arba **pi-mezonu**. Antrasis pasirodė besąs tarsi didžiulis elektronas; jis vadinamas **miujonu**.

Pernelyg daug dalelių?

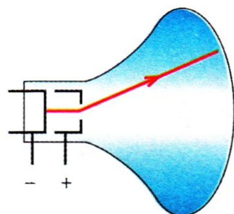
Per tris dešimtmečius, prabėgusius nuo šių atradimų, buvo aptikta ir daugiau mezonų – vidutinės masės dalelių, taip pat ir dalelių, kurių masės buvo net didesnės už nukleono masę. Tai buvo gana netikėta. Klostėsi panaši situacija, kaip buvo chemijoje prieš atrandant Periodinę lentelę (18.2 lentelė) ir ją teoriškai paaiškinančius atomų elektronų sluoksnius. Tokia elementariųjų dalelių teorija vadinama standartiniu modeliu, ji apima ir daleles, aprašomas šiame skyriuje.

Pirmosios naujosios dalelės, kurios yra pagrindinės įprastosios materijos sandaros dedamosios, buvo pavadintos elementariosiomis dalelėmis. Tačiau jau septintajame šio amžiaus dešimtmetyje šių elementariųjų dalelių buvo aptikta daugiau negu yra elementų periodinėje lentelėje. Dauguma jų gyvuoja nepaprastai trumpai. Norint jas suprasti ir kaip nors klasifikuoti, fizikams reikėjo išsiaiškinti jų savybes ir jas palyginti. Pamėginsime tai padaryti, tik prieš tai turime išsiaiškinti, kaip šios dalelės buvo atrastos.

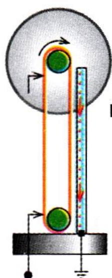
2 DALELIŲ ATRADIMAI

Pirmoji subatominė dalelė, atrasta 1897 metais, buvo elektronas. Tada naudoti katodinių spindulių vamzdeliai (žr. 1-os d. 252 p.) ir dabar tebenaudojami **dalelių greitintuvuose**. Pavyzdžiui, ciklotrone krūvininkai greitinami veikiant magnetiniam laukui, statmenam jų judėjimo krypčiai. Taip jiems suteikiama galimybė judėti lankais. Kaip žinoma, tokiame lauke lanko spindulys priklauso nuo dalelės krūvio, masės ir greičio.

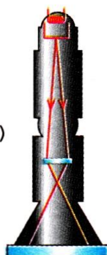
Pagreitintoms dalelėms susiduriant su kitomis, sukuriamos naujos subatominės dalelės, panašiai kaip atsiranda kosminių spindulių dalelės (26.1 pav.). **Dalelių detektoriais** nustatomas naujųjų dalelių judėjimo pobūdis ir jų rūšis. Tiesą sakant, registruojamos ne pačios susidariusios dalelės, o jų pėdsakai, jonizuotos dalelės paliekami detektoriuje. Kaip matysime, dalelės, neturinčios krūvio, pėdsakų nepalieka, tačiau tam tikrus jų buvimo įrodymus detektoriais taip pat pavyksta aptikti.



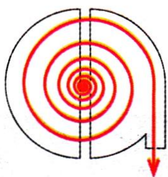
Pavadinimas katodinių spindulių vamzdelis
Dalelės elektronai
Energija 1 keV (1×10^3 V)
Atradimai elektrono masė ir krūvis



Pavadinimas van de Graaffo generatorius
Dalelės protonai/maži jonai
Energija 10 MeV (10×10^6 V)
Atradimai branduolių struktūra



Pavadinimas elektroninis mikroskopas
Dalelės elektronai
Energija 25 keV (25×10^3 V)
Atradimai kristalų, virusų ir ląstelių struktūra



Pavadinimas ciklotronas
Dalelės protonai / maži jonai
Energija 25 MeV (25×10^6 V)
Atradimai branduolių struktūra ir elementų virsmai



Pavadinimas linijinis greitintuvas
Dalelės elektronai / pozitronai / protonai
Energija 50 GeV (50×10^9 V)
Atradimai kvarkų, tau leptono buvimo įrodymas

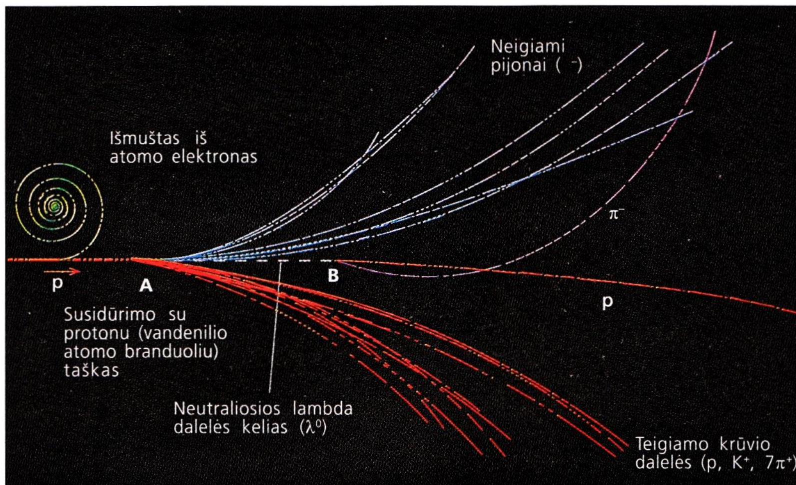


Pavadinimas sinchrotronas
Dalelės protonai
Energija 1 TeV (1×10^{12} V)
Atradimai žemutinis kvarkas

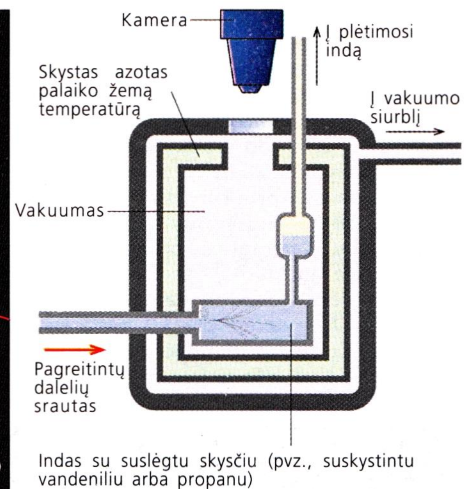
26.3 pav. **Dalelių greitintuvai, kurie buvo naudojami tiriant daleles, aprašomi šiame skyriuje**

Energija ir materija

Pagreitintosios (įgijusios didelę energiją) dalelės yra naudingos tiriant naujas daleles, kadangi pagal specialiąją reliatyvumo teoriją energija ir masė yra lygiavertės ir gali virsti iš vienos į kitą (p. 235).



26.4 a) pav. **Didelės energijos protonui susidūrus su parimusiu protonu atsiranda 18 naujų dalelių**



26.4b) pav. **Burbuliukų kamera. Pluošteliui pakliuvus į kamerą, skysčio slėgis tuoj pat sumažinamas naudojantis plėtimosi indu. Dėl to kameroje esantis skystis užverda tik tuose taškuose, kur yra jonai. Todėl burbuliukų pėdsakai atsiranda tik ten, kur tuo momentu yra krūvininkai**

26.4b) pav. pavaizduota burbuliukų kamera, t. y. dalelių, turinčių elektros krūvį, detektorius. Į kamerą krintantis protonas juda dideliu greičiu, labai artimu šviesos greičiui. Jo kinetinė energija yra labai didelė. Taške **A** susidūręs su vandenilio atomo branduoliu (parimusiu protonu), jis perduoda savo turimą kinetinę energiją naujai susidariusioms dalelėms ir suteikia joms pakankamą kinetinės energijos kiekį, kad jos išsilakstytų į šalis. Pasinaudojus Einšteino sąryšiu: $E = mc^2$:

krintančiojo protono masė-energija → naujai susidariusių dalelių masės ir kinetinės energijos

26.4a) pav. parodytas tokio susidūrimo pavyzdys. Kai kurių dalelių burbuliukų pėdsakai nukrypsta aukštyn, o kai kurių – žemyn. Mažutė itin užsukta spiralė žymi pėdsaką elektrono, kurį atlekiantis protonas netikėtai išmušė iš atomo. Tai ir rodo, kad aukštyn nukrypsta neigiamo, o žemyn – teigiamo krūvio dalelių pėdsakai.

Taške **B** dvi dalelės atsiranda tarsi iš niekur. Tai yra ką tik atsiradę protonas ir neigiamo krūvio pijonas, žymimas simboliu π^-. Tai galima paaiškinti tuo, kad taške **A** gimsta ir kažkokia neutrali dalelė, kuri, nepalikusi pėdsako suspėja nulėkti iki taško B, o jame ir suskyla į šias dvi pastarąsias.

Kai kurie susidūrimai ir skilimai

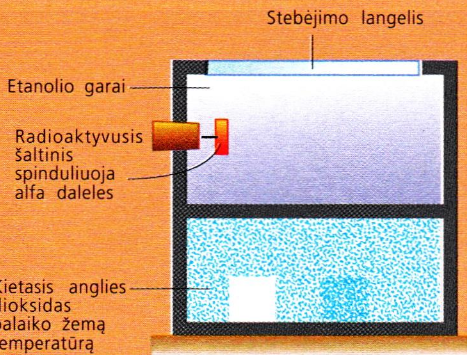
Dalelės, stebimos detektoriuose, tokiuose kaip burbuliukų ar Vilsono kameros, dažniausiai sukelia dviejų tipų reiškinius:

- Paprastųjų smūgių metu jos susiduria su kamerose esančiais branduoliais ir sukelia jų dalijimąsi ir (arba) naujų dalelių atsiradimą.
- Jos pačios suyra – suskyla į kitas daleles arba susiduria su savo antidalelėmis.

Panagrinėkime kiekvieną šių procesų.

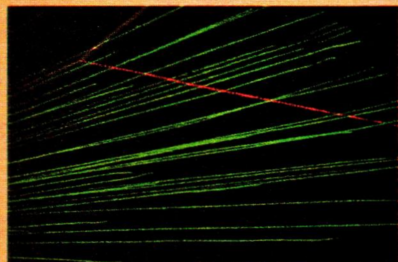
Paprastieji susidūrimai

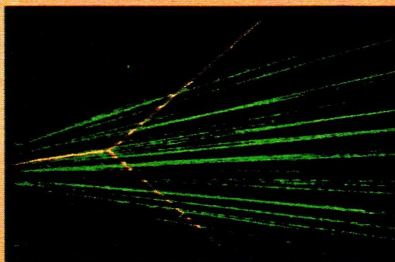
Pažvelkite į **burbuliukų kamerą**, pavaizduotą 26.5b) pav., taip pat į 26.5a) pav., kuriame parodytos tos kameros nuotraukos, kai įskriejusi alfa dalelė susiduria su vandenilio, helio ir azoto branduoliais.

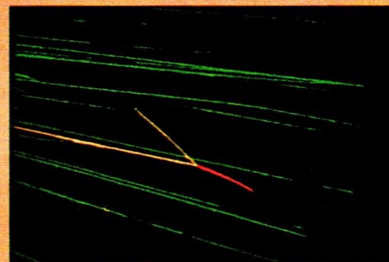


26.5b) pav. **Burbuliukų kamera. Etanolio kondensatas palieka garų pėdsakus apie krūvininkus, judančius kameroje**

26.5a) pav. **Trys burbuliukų kameros nuotraukos, kuriose užfiksuoti alfa dalelių susidūrimai. Kairėje: Alfa dalelė (geltonas pėdsakas) vandenilyje; sunki alfa dalelė, susidūrusi su lengvais vandenilio atomo branduoliais, tik šiek tiek nukrypsta nuo pradinės judėjimo krypties. (Žaliai pažymėti pėdsakai visai nenukrypsta, tai atitinka laisvai praskriejusias alfa daleles). Centre: Alfa dalelė susiduria su helio atomo branduoliu. Kadangi tas branduolys yra taip pat alfa dalelė (jų masės vienodos), po smūgio abi jos nuskrieja vienodais kampais. Dešinėje: Alfa dalelė ore susiduria su azoto branduoliu. Azoto branduolys yra 4,5 karto masyvesnis už alfa dalelę, todėl ji atsimušusi beveik atšoka atgal.**







Nuotraukose matyti, kad kampas tarp alfa dalelės atskriejimo krypties ir po susidūrimo nuskriejančio į šalį branduolio judėjimo krypties labiausiai priklauso nuo alfa dalelės ir to branduolio masių santykio.

Kitas paprasto skirtingų masių dalelių susidūrimo pavyzdys buvo pateiktas 26.1c) pav., kuriame sunki kosminių spindulių dalelė – sieros branduolys – susiduria su fotografinėje emulsijoje esančiu branduoliu. Mėlynai pažymėti įvairių branduolių, o geltonai – mažiau jonizuotų dalelių, atsiradusių susidūrimo metu – pijonų – pėdsakai.

Skylančiosios dalelės

Nestabilios dalelės yra panašios į nestabilius (radioaktyviuosius) branduolius: yra žinoma, kas gali atsitikti su tokia paviene dalele, bet neįmanoma žinoti, kada tai įvyks. Ilgainiui visos susidariusios nestabilios dalelės suskyla į **stabilias materijos daleles**, kurios yra protonai, elektronai ir neutrinai. Kartais išspinduliuojama elektromagnetinė dalelė – **fotonas**; galimi netgi atvejai, kai visiškai suskylama į fotonus, ir materijos po tokio akto iš viso nelieka. Panašiai kaip radioaktyvių branduolių atveju, galima neabejoti tik tuo, kad pusė visų bet kokios rūšies nestabilių dalelių suskils per tam tikrą laiką, vadinamą dalelės *pusėjimo trukme*.

Yra tiksliai nustatyta, kad kiekviena dalelė turi antidalelę, labai panašią, bet su radikaliai priešingomis savybėmis. Pavyzdžiui, elektrono antidalelė pozitronas yra labai į jį panašus kitomis savybėmis, bet turi priešingą nei elektronas krūvį. Dalelės ir antidalelės sudaro tai, kas vadinama **medžiaga** ir **antimedžiaga**.

Antidalelei susidūrus su dalele, jos viena kitą sunaikina. Jų masėsenergijos virsta naujomis dalelėmis – fotonais ir masyviomis dalelėmis, kurios gali būti aptinkamos detektoriaus.

3 TVARKOS PAIEŠKOS: DALELIŲ KLASIFIKACIJA

Pirmoji problema, kuri iškilo dalelių tyrinėtojams, buvo kaip nors suklasifikuoti tokią daugybę dalelių. Pirmiausia, aišku, reikėjo jas kaip nors pažymėti. Buvo pasirinktos graikų alfabeto raidės, tokios kaip:

μ	Miu „mezonas" arba miujonas	Ξ	Chi dalelės
π	Pi mezonai arba pijonai	Σ	Sigma dalelės
K	Kapa mezonai arba kajonai	Ω	Omega dalelės
Λ	Lambda dalelės		

Krūvis

Krūvis būna teigiamas arba neigiamas. Jis taip pat yra „kvantuotas": ir teigiami, ir neigiami krūviai yra proporcingi elementariajam krūviui, $-e$ arba $+e$, kurio dydis lygus $\pm$ 1,6 $\times$ 10^{-19} C. Tačiau krūvis nelabai ką tepagelbėjo bandant klasifikuoti tiek daug dalelių.

Masė

Masė atrodė patikimesnis klasifikavimo kriterijus, todėl dalelės, atrastos nuo 1940-ųjų iki 1960-ųjų, buvo suskirstytos į tris grupes, parodytas 26.1 lentelėje.

Šis grupavimas taip pat turi trūkumų: miujono masė yra beveik tokia pat, kaip pijono. Taip pat buvo atrastos naujos dalelės – tokios, kad kai kurie leptonai tapo daug masyvesni už lengviausią mezoną, taip pat naujieji mezonai, masyvesni netgi už protoną. Kaip pamatysime vėliau, šios grupės turi dar ir kitokių savybių, kurios klasifikuojant daleles pasirodė svarbesnės nei jų masė.

26.1 lentelė. **Bandymas klasifikuoti daleles pagal jų masę (nelabai sėkmingas)**

Pavadinimas	Masė	Pavyzdžiai
Mezonai	Vidutinė	Pijonai, kajonai
Barijonai	Didelė	Protonai, neutronai, lambda, sigma, chi
Leptonai	Maža	Elektronai, miujonai, neutrinai

■ Žr. nuo 1 iki 6 klausimo.

?

B Įsitikinkite, kad protono masės ekvivalentas yra apie 1 GeV.

Masės ir energijos vienetai dalelių fizikoje

Pagal reliatyvumo teoriją, dalelės masė priklauso nuo jos greičio. Taigi reikia imti masės reikšmę, atitinkančią parimusią dalelę, vadinamą jos **rimties mase** (žr. 234 p.). Pagal reliatyvumo teoriją masė ir energija yra susijusios Einšteino formule $E = mc^2$. Fizikai dalelių *mases būtent ir matuoja energijos vienetais.*

Paprastai tyrimuose naudojami krūvininkai, kurie, judėdami didelio potencialų skirtumo laukuose, labai pagreitinami ir įgyja didžiulę masę–energiją. Gal dėl šios priežasties dalelių fizikoje įprasta tą *energiją, taigi ir masę, matuoti elektriniu vienetu*, vadinamu **elektronvoltu eV**.

1 elektronvoltas (eV) yra energija, kurią įgauna dalelė, kurios krūvis lygus elektrono krūviui $e = 1.6 \times 10^{-19}$ C, kai ji nuskrieja vieno volto potencialų skirtumą, 1 V.

$$1 \text{ eV} = 1{,}6 \times 10^{-19} \text{ C} \times 1 \text{ J} \cdot \text{C}^{-1} = 1{,}6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

ir

$$1 \text{ J} = 6{,}25 \times 10^{18} \text{ eV}$$

Protono masė lygi 1,6726 $\times$ 10^{-27} kg. Energijos vienetais tai sudaro

$$E = m_p c^2 = 1{,}6726 \times 10^{-27} \times (3 \times 10^8)^2 \text{ J} = 1{,}5053 \times 10^{-10} \text{ J}$$

Rimties masė GeV/c^2 vienetais

Protono masė-energija yra apie 10^9 eV, arba 1 GeV. Reikia apdairiai naudotis šia neįprasta vienetų sistema. Pavyzdžiui, iš Einšteino formulės gauname:

$$m = E/c^2$$

$$\frac{\text{energija eV vienetais}}{(\text{šviesos greitis})^2} = \frac{\text{GeV}}{c^2}$$

Taigi protono rimties masė šiais vienetais lygi 1, arba:

$$m_p = 1 \text{ GeV}/c^2$$

Būtent šiais vienetais nurodytos visos dalelių masės, kurias rasite šio skyriaus lentelėse. Skaičiavimų pavyzdžių rasite 271 p.

Naujos esminės dalelių savybės

Po to, kai paaiškėjo, kad dalelių krūvis ir masė nepakankami klasifikacijai, pradėta ieškoti kitokių jų bendrumų ar skirtumų. Rastos naujos jų savybės yra esminės, kaip ir krūvis ar masė, ir kartu visiškai nesuprantamos. Jų pavadinimai gana egzotiški. Tai *žavesys, puikumas, barijoninis skaičius ir keistumas*. Naudojant šias savybes, daleles jau lengviau klasifikuoti.

Materija ir jėgos: hadronai ir leptonai

Kaip jau gerai žinome, krūviai sąveikauja elektromagnetinėmis, o masės – gravitacijos jėgomis. Raktas elementariųjų dalelių skirtumams rasti buvo būtent tai, kaip jas veikia vienos ar kitos jėgos.

Protonus branduoliuose veikia ir elektromagnetinės, ir gravitacijos jėgos. Kadangi elektromagnetinės stūmos jėgos (visi protonai turi vienodus krūvius) yra daug stipresnės už gravitacijos (traukos) jėgas, tai tik šių dviejų jėgų veikiami jie negalėtų išsilaikyti branduoliuose. Vadinasi, tarp protonų branduoliuose turi veikti kažkokios dar stipresnės traukos jėgos. Tai yra **stiprioji branduolinė sąveika** (žr. 245 p.).

Visos dalelės, kurios patiria šią sąveiką, vadinamos **hadronais**. Jų šeimą sudaro dvi grupės – **mezonai** ir **barijonai**. Dalelės, kurios nepatiria šios sąveikos, vadinamos **leptonais**. Remiantis šia dalelių savybe galima suskirstyti jas į dvi reikšmingas grupes, parodytas 26.2 lentelėje: pijonai yra hadronai, kadangi patiria stipriąją branduolinę sąveiką, o elektronai ir miujonai yra leptonai, nes nėra jos veikiami. (Šią klasifikaciją vėliau dar išplėtosime, atsisakydami grupavimo, pateikto 26.1 lentelėje).

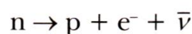
26.2 lentelė. **Hadronų, patiriančių stipriąją branduolinę sąveiką, ir jos nepatiriančių leptonų pavyzdžiai. Atkreipkite dėmesį, kad gravitonai (jei jie egzistuoja) ir fotonai nėra hadronai**

Hadronai	Leptonai
Mezonai, tokie kaip pijonai, kaonai ar eta mezonai	Apima elektronus, miujonus, neutrinus
Barijonai, tokie kaip protonai, neutronai, omega, sigma, lambda dalelės	Fotonai, gravitonai (jei jie egzistuoja)

Leptonų šeima detaliau aprašoma toliau (251 p.).

Kitas esminis skirtumas tarp leptonų ir hadronų yra tas, kad, kiek šiuo metu žinoma, *leptonai yra neskaidomos*, t. y. *fundamentalios* dalelės, tuo tarpu hadronai yra sudaryti iš dar smulkesnių (fundamentalių) dalelių, vadinamų **kvarkais** (žr. 256 p.).

Dauguma hadronų ir leptonų yra nestabilūs: jie gana greitai skyla į kitas daleles ir baigia savo gyvavimą kaip vienintelės stabilios Visatos dalelės, t. y. protonai, elektronai ir neutrinai. Netgi neutronas yra nestabilus, kadangi būdamas laisvas (ne branduolyje) jis skyla į protoną, elektroną ir antineutriną. Šios skilimo pusėjimo trukmė lygi apie 11 minučių:



$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$$

Dalelės ir antidalelės

Kiekvienas hadronas turi savo antidalelę, pavyzdžiui, egzistuoja:

Protonas ir antiprotonas p^+ ir p^-

Neutronas ir antineutronas n^+ ir $\bar{n}$

Kapa mezonas (arba kajonas) K^+ ir K^-

Dažnai antidalelės žymimos ta pačia raide, kaip ir dalelės, tik su brūkšneliu viršuje, panašiai kaip antineutronas, ypač tuo atveju, kai dalelė yra neutrali.

Jėgos ir sąveikos

Jėgos visada pasireiškia poromis: kai dvi dalelės kaip nors sąveikauja, tai jėga, veikianti pirmąją dalelę, yra lygiai tokia pat, kaip ir veikianti antrąją, tik jos veikia į skirtingas puses. Šis efektas vadinamas dalelių sąveika. Įprasta kalbėti apie keturias *fundamentaliąsias* sąveikas: elektromagnetinę, silpnąją, stipriąją ir gravitacinę. Kaip pamatysime, jei tik kokios dalelės sąveikauja, tai būtinai turi būti dalelė, „perduodanti tą sąveiką" – ji tarsi „tarpininkauja sąveikaujančiosioms". Pernešančiosios jėgą dalelės, žinomos kaip **pakaitinės dalelės**, priklauso **kalibracinių bozonų** grupei (žr. 26.3 lentelę).

26.3 lentelė. **Kalibraciniai bozonai**

Sąveika	Dalelė	Santykinis stipris
Stiprioji	Gliujonas (g)	1
Elektromagnetinė	Fotonas (γ)	10^{-2}
Silpnoji	W, Z bozonai	10^{-7}
Gravitacinė	Gravitonas (dar neatrastas)	10^{-36}

Šiuolaikinės teorijos teigia, kad esant labai didelėms energijoms visos šios jėgos susilieja į vieną. Kol kas eksperimentiškai įrodyta tik kad tai atsitinka bent jau su elektromagnetine ir silpnąja sąveika – jos virsta vadinamąja silpnąja elektrine sąveika.

Sąveikų laiko skalės

Kiekviena sąveika turi būdingą laiko skalę, apibūdinamą gyvavimo (arba pusėjimo) trukme (žr. 273 p.). Kuo stipresnė sąveika, tuo greičiau viskas vyksta, pavyzdžiui įvykių su hadronais, kuriuos sukelia stiprioji sąveika, būdingieji laikai trunka mažiau nei 10^{-10} s. Tai taip pat galioja hadronų vidiniams virsmams („sąveikoms", kuriose dalyvauja tik viena dalelė), pasireiškiantiems jų skilimu.

Silpnosios sąveikos sukeliami įvykiai vyksta lėtai. Tai paprastai milijonosios sekundžių dalys; tai labai ilga trukmė dalelių sąveikos požiūriu.

Sąveikų laiko skalės gali būti išmatuotos detektoriais. Būdingieji laikai atskleidžia, koks įvykis galėjo sukelti sąveiką ir kokios dalelės galėjo dėl to atsirasti, net ir tais atvejais, kai jų detektoriai nefiksuoja.

Silpnoji branduolinė jėga (sąveika)

Žr. 7 klausimą. ■

Silpnoji branduolinė jėga (sąveika) yra pati paslaptingiausia iš visų jėgų. Panašiai kaip ir stiprioji, ji yra artisiekė. Šiuolaikinės teorijos teigia, kad esant gana didelei energijai, silpnoji ir elektromagnetinė jėgos susilieja į tam tikrą **elektrosilpnąją jėgą**. 261 p. sužinosime, kad silpnoji jėga veikia vienam kvarkui virstant kitu.

Silpnoji branduolinė jėga sukelia hadronų skilimą, stiprioji juos išlaiko branduoliuose, gravitacijos jėga veikia tarp visų masių, turintys nenulinį krūvį hadronai sąveikauja taip pat ir elektromagnetine sąveika. Taigi hadronų sąveikų spektras itin platus.

Leptonai

Leptonai apskritai yra mažesnės nei hadronai masės dalelės. Graikų k. būtent „hadron" reiškia sunkus, o „lepton" – mažas. Leptonus veikia tik trys fundamentaliosios jėgos – elektromagnetinė (jei tų leptonų krūviai nelygūs nuliui), silpnoji ir gravitacijos.

Yra trys leptonų rūšys: **elektronai** e, **miujonai** μ, ir **taujonai** τ. Kiekvienam jų priskiriamas savo rūšies **neutrinas** ν.

Elektronai ir neutrinai yra stabilios dalelės, bet ir miujonai, ir taujonai skyla. Jų skilimą sąlygoja silpnoji jėga, todėl jų gyvavimo laikas yra daug ilgesnis už nestabiliųjų hadronų gyvavimo laikus. Taujonas, masyviausias iš visų leptonų, yra toks masyvus, kad gali skilti į hadronus. 26.4 lentelėje parodyti pagrindiniai leptonai ir jų neutrinai.

	Leptonai			Antileptonai		
	Elektronas	Miujonas	Taujonas	Pozitronas	Miujonas plius	Taujonas plius
	e^-	μ^-	τ^-	e^+	μ^+	τ^+
Neutrinas	ν_e	ν_μ	ν_τ	ν_e	ν_μ	ν_τ
Leptoninis skaičius	1	1	1	– 1	– 1	–1

26.4 lentelė. **Leptonai ir jų neutrinai. Kiekvienas neutrinas kuo nors skiriasi nuo kitų**

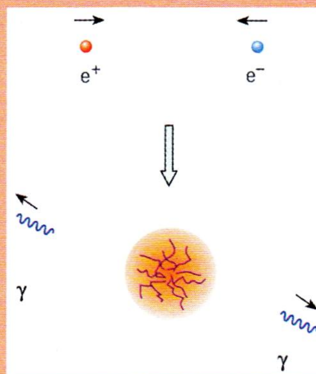
Materija ir antimaterija

Kai dalelė sutinka savo antidalelę, jos abi tuoj pat anihiliuoja. Jų masių energija virsta naujomis dalelėmis (su savo masėmis ir kinetinėmis energijomis), taip pat ir (arba) spinduliuote. Labiausiai įprastas materijos ir antimaterijos anihiliacijos procesas yra elektrono ir pozitrono susidūrimas:

Elektronas + pozitronas → 2 fotonai

$$e^- + e^+ \rightarrow 2\gamma$$

Kodėl du fotonai? Fotonas turi ne tik energiją, bet ir judesio kiekį. Judesio kiekis turi būti toks, kad nesutrikdytų tvermės dėsnio. Jei dalelė ir antidalelė susiduria kaktomuša ir prieš susidūrimą juda tokiais pat, tik priešingų krypčių, greičiais, tai visas pradinis judesio kiekis lygus nuliui. Jei po anihiliacijos atsirastų tik vienas fotonas, jo judesio kiekis turėtų būti lygus nuliui. Kadangi tokio fotono negali būti, tai įmanomas tik dviejų fotonų, kurių *judesio kiekis yra toks pat*, tik kiekvieno nukreiptas į *priešingas* puses, atsiradimas anihiliacijos metu, kaip parodyta 26.6 pav.



26.6 pav. **Elektrono ir pozitrono porai anihiliuojant jų masių energijos pereina į fotonus. Judesio kiekio tvermės dėsniui išlaikyti po anihiliacijos turi atsirasti du vienodos energijos fotonai, judantys priešingomis kryptimis. Atkreipkite dėmesį, kad tada išlaikytas ir krūvio tvermės dėsnis**

Porų susidarymas

Lygiai taip pat, kaip elektrono ir pozitrono pora virsta fotonais, fotonai, turintys pakankamai energijos, gali sudaryti tokią arba dar masyvesnių energijų poras. **Porų susidarymas**, kaip matyti burbuliukų kameroje, parodytas 26.7 pav. Reakcija įvyksta tik stipriame elektriniame lauke – pavyzdžiui, netoli kokio atomo branduolio.



26.7 pav. **Gama spindulių fotonai (nematomi, nes nepalieka pėdsako) įskrieja į burbuliukų kamerą iš kairės. Vienas fotonų skyla į elektrono ir pozitrono porą. Atsiradęs elektronas spirale sukasi žemyn, o pozitronas – aukštyn. (Tiesesnį pėdsaką palieka elektronas, kurį tas pats fotonas išmuša iš kokio nors kameroje buvusio atomo). Toliau dešinėje matyti kito fotono skilimas į elektrono ir pozitrono porą**

?

C Perskaitykite tekstą po 26.7 pav. Kuri elektrono ir pozitrono pora turi didesnę energiją? Paaiškinkite, kodėl.

4 IEŠKANT ELGESIO MOTYVŲ

Taigi išnagrinėjome, kaip dalelės klasifikuojamos pagal mums žinomas savybes, tokias kaip masė ar krūvis bei jų reakcija į poveikį. Tačiau norint suprasti fundamentalią dalelių prigimtį, reikia suvokti, kas gali įvykti ir *ko negali įvykti* sąveikaujant ar kitaip kintant dalelėms, t. y. joms savaime skylant arba sąveikaujant esant didelėms energijoms.

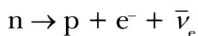
Elgesio taisyklės

Fundamentaliosios dalelės pirmiausia turi laikytis pagrindinių fizikos taisyklių, kurios jums jau yra žinomos. Štai jos:

- **Judesio kiekio tvermė.** Bet kaip sąveikaujančių dalelių sistemos judesio kiekis nekinta.
- **Masės energijos tvermė.** Bet kaip sąveikaujančių dalelių sistemos pilnoji masės energija negali keistis.
- **Krūvio tvermė.** Bet kaip sąveikaujančių dalelių sistemos krūvis savaime pasikeisti negali.

Šias taisykles iliustruoja tokie pavyzdžiai:

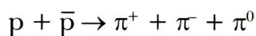
1 pavyzdys. Neutrono skilimas



$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

Neutrono masės energija lygi 939,6 MeV, protono – 938,3 MeV, o elektrono – 0,5 eV. Taigi neutronas gali pavirsti į daleles, įvardytas dešinėje reakcijos pusėje ir dar gali likti apie 0,8 MeV produktų kinetinei energijai ir antineutrinui susidaryti. Kadangi neutrono krūvis lygus nuliui, tokia pat yra ir visų skilimo produktų krūvių suma.

2 pavyzdys. Protono ir antiprotono anihiliacija

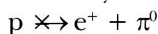


$$p + \bar{p} \rightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^0$$

Šioje reakcijoje taip pat krūvis išlieka nepakitęs. Protono ir jo antidalelės masių energijų suma lygi 1876 MeV. Kiekvieno pijono, turinčio elektrinį krūvį, masės energija lygi 140 MeV, tuo tarpu neutralaus pijono ji yra tik 135 MeV. Taigi dešinės lygties pusės masės energijos yra daugiau nei gana sukurti visai pijonų trijulei (415 MeV), o likusi masės energija virsta kinetine energija, ir pijonai dideliais greičiais išlaksto į įvairias puses (žinoma, taip, kad būtų išlaikyta judesio kiekio tvermė).

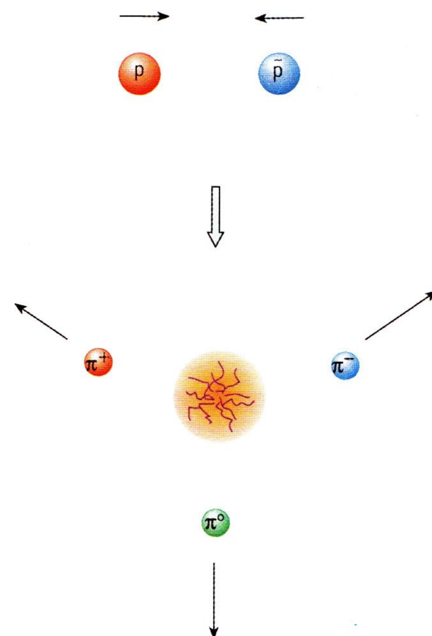
3 pavyzdys. Kai numatoma reakcija negali įvykti

Netrukus fizikai atrado, kad kai kurios reakcijos, kurios atitikdavo visus tris tvermės dėsnius, neįvykdavo jokiomis sąlygomis, netgi padidinus sąveikoje dalyvaujančių dalelių energijas. Pavyzdžiui, protonas niekaip savaime neskyla į pozitroną ir neutralų pijoną, netgi jei krūvio, energijos ir judesio kiekio tvermės dėsniai yra išlaikyti.



$$p \not\leftrightarrow e^+ + \pi^0$$

Tai yra labai gerai, nes priešingu atveju protonai tučtuojau suskiltų ir negalėtų egzistuoti nei atomų branduoliai, nei atomai, nei chemija, nei gyvybė ir netgi žvaigždės!



26.8 pav. **Protono ir antiprotono anihiliacija**

?

D Remdamiesi krūvio tvermės dėsniu, patikrinkite, ar galėtų vykti tokios reakcijos:

a) $K^+ + n \rightarrow K^0 + \Sigma^+$

b) $p + n \rightarrow p + n + \pi^-$

c) $K^+ + n \rightarrow \pi^0 + \Delta^+$

Barijonų skaičius paaiškina, kodėl kai kurios reakcijos vykti negali

Kadangi visiškai atitinkančių tuos tris tvermės dėsnius, bet niekada neįvykstančių reakcijų gali būti sugalvota nemažai, fizikams teko ieškoti dar kokio nors tvermės dėsnio, kurį patenkinti būtų privaloma. Kadangi tvermės dėsniai paremti kokio nors „krūvio“ išsilaikymu tam tikruose procesuose, reikėjo rasti dar kokią nežinomą dalelių savybę, tenkinančią tą tvermės dėsnį. Nagrinėtu nevykstančio protono skilimo atveju tai turėtų būti koks nors krūvis (savybė), kurią turi protonas, bet negali turėti nei pozitronas, nei pijonas.

Panagrinėję negalimas reakcijas fizikai suprato, kad šį naujo tipo krūvį turi tik sunkiosios dalelės, barijonai. Priešingai nei elektros krūvis, jis nesukelia jokių jėgų, tačiau panašiai kaip elektrinis, pasirodo tik tam tikromis „porcijomis“. Tas krūvis pavadintas **barijonų skaičiumi** ir žymimas raide B.

Protonas ir neutronas turi barijonų skaičių, lygų vienetui, o elektronų, neutrinų, pozitronų ir pijonų barijonų skaičius lygus nuliui.

Taigi protono skilimas nurodytu trečiajame pavyzdyje būdu vykti negali, nes įvairiose užrašytos lygties pusėse barijonų skaičius yra skirtingas, ir jo tvermės dėsnis tokioje reakcijoje netenkinamas:

1 nelygu 0

Tačiau skylant neutronui į protoną (pirmasis pavyzdys), barijonų skaičius, kaip ir turėtų būti, tą tvermės dėsnį išlaiko, nes neutrono barijonų skaičius irgi lygus vienetui.

26.5 lentelė. **Kai kurios dalelės ir jų barijonų skaičius**

Dalelė	Barijonų skaičius B
Barijonai, tokie kaip protonas, neutronas, sigma ir kiti	1
Barijonų antidalelės, pavyzdžiui, antiprotonas	–1
Mezonai, tokie kaip pijonas, kajonas ir kiti Leptonai, tokie kaip elektronas, pozitronas ir kiti	0

?

E Naudodamiesi 26.5 lentele raskite, kuriose iš pateiktų reakcijų neišlaikomas barijonų skaičiaus tvermės dėsnis ir todėl jos nevyksta:

a) $\pi^+ + n \rightarrow K^0 + \Sigma^+$

b) $\pi^+ + p \rightarrow K^+ + \Sigma^+$

c) $K^+ + n \rightarrow \pi^0 + \pi^+$

✓

Kaip matote, 26.4 lentelėje pateiktos trys leptonų poros, bet kiekvienai jų priskiriamas tas pats leptonų skaičius. Tai šiek tiek komplikuoja aprašymą, tačiau turi gilesnę prasmę, nes leidžia kai ką daugiau, nei iš pirmo žvilgsnio atrodo, nuspėti apie neutrinų, šių dalelių – šmėklų – savybes.

Žr. 9–11 klausimus. ■

?

F Apskaičiuokite, kiek laiko reikia perturbacijai, sklindančiai šviesos greičiu (3×10^8 m/s) nuskrieti atstumą, lygų atomo branduolio skersmeniui (10^{-14} m).

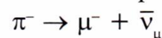
G Perturbacija kokioje nors medžiagoje plinta greičiu, lygiu garso greičiui toje medžiagoje. Įvertinkite, kiek laiko reikia suskilti atsimušusiam į grindis puodukui, jei garso greitis keramikoje lygus apie 5000 m/s.



26.9 pav. **Puodukas negali suskilti greičiau nei reikia laiko smūginei bangai jį praskrosti**

Dabar grįžkime prie reakcijos, pateiktos antrajame pavyzdyje, kur du barijonai (protonas ir antiprotonas) virsta pijonais. Jos dešinėje pusėje yra tik pijonai, taigi barijonų skaičių suma lygi *nuliui*. Vadinasi, kairiosios pusės barijonų skaičių sumą taip pat turi būti lygi nuliui. Tai įmanoma tik tuo atveju, jei antiprotonui priskiriama *neigiama* barijonų skaičiaus vertė (B = –1).

Atkreipkite dėmesį, kad 26.2 lentelėje (250 p.) mezonai ir barijonai yra priskirti tai pačiai hadronų grupei, nors mezonų barijoninis krūvis lygus nuliui. Leptonai taip pat turi barijonų krūvį, lygų nuliui, bet skiriasi nuo mezonų tuo, kad turi dar ir savitą, **leptonų krūvį L**. Kaip matosi iš 26.4 lentelės, tas leptonų krūvis leptonams lygus 1, jų antidalelėms lygus –1, o dalelėms, kurios nėra priskiriamos leptonų grupei, jis lygus nuliui. Norint patenkinti leptonų tvermės dėsnį reakcijoms, kai leptonai susidaro iš dalelių, kurios nėra leptonai, jie turi atsirasti poromis, pavyzdžiui:



$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$

Pijonai yra ne leptonai, todėl kairiosios šios reakcijos pusės leptonų skaičius lygus nuliui. Dešiniojoje pusėje turime vieną leptoną su leptonų skaičiumi, lygiu vienetui, ir vieną antileptoną, taigi jų suma lygi nuliui.

Kuo daugiau neleistinų reakcijų, tuo daugiau naujų dalelių savybių

Reakcijų, kurios niekada nevyksta, paieška yra puiki dalelių klasifikavimo priemonė. Jas nagrinėjant buvo atrastos **keistosios dalelės**, t. y. dalelės, kurios nusakomos keistumo skaičiumi, arba tiesiog **keistumu**, kuris turi būti išlaikytas. Šią savybę ir dėsnį paaiškino kvarkų teorija (žr. 256 p.), kuri itin supaprastino dalelių klasifikacijos problemą.

Keistumas ir laikas

Reakcijos, kurias sukelia stiprioji branduolinė jėga, vyksta labai greitai. Jų būdingieji laikai yra 10^{-23} s eilės. Tai laikas, būtinas šviesos greičiu plintančiai stipriajai sąveikai praskrieti atstumą, lygų branduolio ar hadrono skersmeniui.

Būdinga tokio tipo reakcija:



$$p + \pi^- \rightarrow K^0 + \lambda \qquad \text{Laikas} = 10^{-23} \text{ sekundės}$$

Šioje reakcijoje susidariusi lambda dalelė taip pat nestabili – ji suskyla, bet laikas, per kurį tai įvyksta, yra apie 3×10^{-10} s.

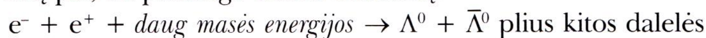
Pabandykime palyginti šiuos laikus labiau suvokiamu būdu. Kai atsitrenkęs į grindis sudūžta porcelianinis puodukas, tai įvyksta maždaug per kelias milisekundes. (Galite daugmaž įvertinti šį laiką apskaičiavę, kiek laiko reikia smūginei bangai praskrosti puoduką, nes paprastai jis suskyla į keletą netaisyklingų dalių ir tai įvyksta beveik vienu akimirksniu).

Abu laikai, per kuriuos įvyksta dalelių skilimai, yra labai trumpi, bet vis dėlto vienas 10^{13} kartų ilgesnis už antrąjį. Puoduko laiko skalėje palyginimas būtų toks: pirmasis jo skilimas, tarkime, į dvi dalis, įvyksta per 10^{-4} s, o vėliau, praėjus po pirmojo įvykio *trejiems metams*, viena dalių dar skyla į mažesnes.

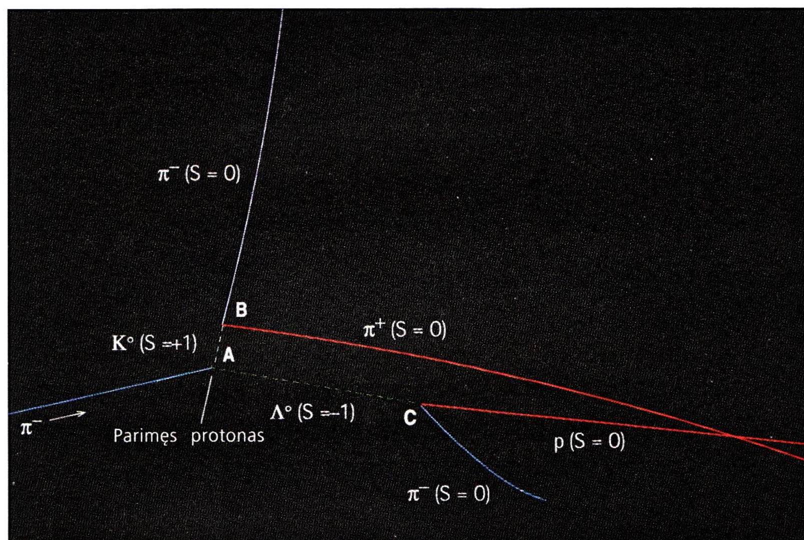
Šios naujosios itin ilgai gyvuojančios dalelės negalėjo būti nusakytos jokiais žinomais skaičiais, tokiais kaip masė, krūvis ar barijonų krūvis, todėl jas teko pavadinti keistosiomis dalelėmis. Tai yra K (kaonas kappa), lambda dalelė, sigma dalelė, taip pat chi ir omega dalelės (žr. 26.6 lentelę).

Jų elgesys įvairių reakcijų metu gali būti paaiškinamas pasinaudojus dar vienu fundamentiniu „krūviu“ arba savybe, kuri buvo pavadinta **keistumu**, žymimu raide S. Dalelių keistumai prabėga reikšmes nuo –3 iki +3. Tai leido dar ir paskelbti „trejukių“ idėją, prie kurios dar grįšime (256 p.).

Keistumo tvermė išlaikoma tik reakcijose, kurias sukelia stiprioji sąveika. Pavyzdžiui, susiduriant pakankamai didelių energijų elektronui ir pozitronui gali atsirasti sunkieji barijonai, vadinami **hiperonais**, jei susidūrimo energija yra pakankamai didelė atsirasti šioms dalelėms. Jei taip atsitinka, hiperonai atsiranda tik po du, kiekvienas tos poros narys turi tokį pat, tik priešingo ženklo keistumą:


$e^- + e^+ +$ *daug masės energijos* $\rightarrow \Lambda^0 + \bar{\Lambda}^0$ plius kitos dalelės

Įprasti barijonai (protonai ir neutronai) turi keistumą, lygų nuliui. Keistųjų dalelių Λ ir Σ keistumas yra *neigiamas*, o jų antidalelių keistumas – toks pat, bet *teigiamas*.

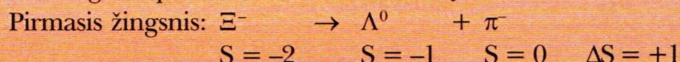


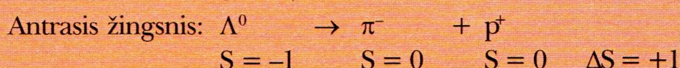
26.11 pav. **Pijonas, sąveikaudamas su protonu, sudaro dvi keistąsias daleles (K^0 ir Λ^0), kurios yra neutralios ir todėl nepalieka pėdsakų. Tačiau matyti, kaip jos vėliau skyla.**
Keistumas išlaikytas taške A, kadangi tą skilimą sukelia stiprioji sąveika, bet pakinta ±1 reakcijų, kurios vyksta taškuose B ir C, metu

Keistumo tvermės dėsnio sutrikdymas

Kai kurie tvermės dėsniai galioja tik veikiant stipriajai, o kai kurie – tik veikiant silpnajai sąveikai. Vienas tokių dėsnių yra keistumo tvermės dėsnis. Buvo nustatyta, kad keistosios dalelės gali skilti į daleles, kurių keistumas lygus nuliui, t. y. *pažeisdamos keistumo tvermės dėsnį*. Tačiau tai gali atsitikti tik tada, jei skilimą sukelia silpnoji sąveika, ir tokio skilimo metu keistumas gali pakisti ne daugiau kaip vienetu.

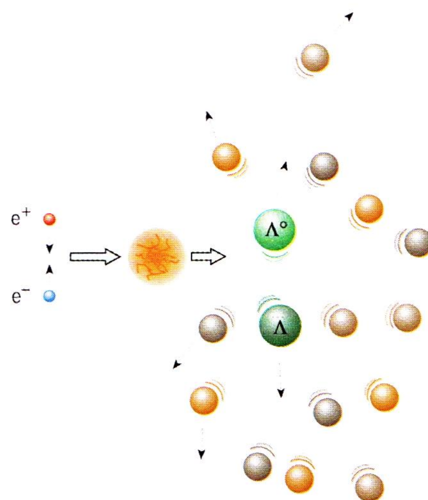
Tokiu atveju, pavyzdžiui, **chi hiperonas** (kartais dar vadinamas kaskadiniu hiperonu) dėl silpnosios sąveikos skyla į lambda hiperoną, prarasdamas keistumo vienetą, o po to lambda hiperonas skyla į hadronus (daleles, kurios patiria stipriąją sąveiką), kurių keistumas lygus nuliui, taigi vėl praranda keistumo vienetą.


Pirmasis žingsnis: $\Xi^- \rightarrow \Lambda^0 + \pi^-$
$S = -2 \quad S = -1 \quad S = 0 \quad \Delta S = +1$


Antrasis žingsnis: $\Lambda^0 \rightarrow \pi^- + p^+$
$S = -1 \quad S = 0 \quad S = 0 \quad \Delta S = +1$

26.6 lentelė. **Kai kurios keistosios dalelės ir jų keistumo vertės**

Dalelė	Keistumas S
K^+, K^0 (mezonai)	+1
K^-, K^0 (mezonai)	–1
Lambda (barijonas)	–1
Sigma (barijonas)	–1
Chi (barijonas)	–2
Omega (barijonas)	–3



26.10 pav. **Susidūrę didelių energijų elektronas ir pozitronas sudaro keistųjų dalelių porą – lambda ir antilambda, taip pat daug kitokių dalelių, daugiausiai – mezonų**

?

H Patikrinkite, ar šiose reakcijose išlaikytas keistumo tvermės dėsnis:

a) $\pi^- + p \rightarrow K^+ + \Sigma^-$
b) $K^- + p \rightarrow K^+ + \Xi^-$
c) $\pi^- + p \rightarrow K^- + \Sigma^+$
d) $\pi^+ + n \rightarrow \pi^+ + \Lambda$

■ Žr. 12 ir 13 klausimus.

5 KVARKAI PADARO TVARKĄ SUMAIŠTYJE

Aprašyti dalelių klasifikavimo metodai buvo nepaprastai naudingi, kadangi leido nuspėti reakcijų rezultatus. Deja, nebuvo jokios *teorijos ar bent modelio*, paaiškinančio, *kodėl* taip, o ne kitaip viskas vyksta. Padėtis buvo panaši kaip chemijoje prieš atsirandant Mendelejevo periodinei lentelei.

Revoliucinė teorija, paaiškinanti mūsų minėtas „trejukes“, teigė, kad masyviosios dalelės (barijonai) gali būti sudarytos iš *trijų mažesnių dalelių* derinių. Teorija buvo pagrįsta stulbinančia idėja, kad naujosios dalelės gali turėti ne elementariuosius, kaip įprasta, krūvius, o jų dalis – *trečdalius arba dvi trečiąsias*.

Tais laikais beveik niekas, netgi pats **kvarkų** atradėjas amerikietis M. Gelis-Manas (*Murray Gell-Mann*, 1929) netikėjo, kad kvarkai gali *realiai* egzistuoti.

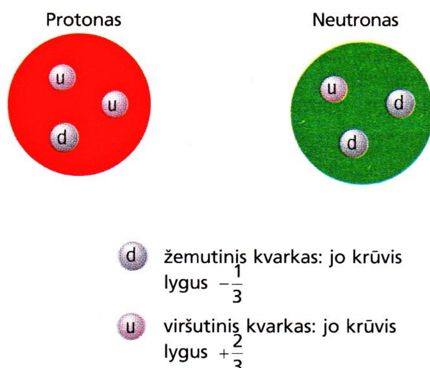
Tik kiek vėliau ši teorija buvo paremta eksperimentais, kuriuose į pavienius protonus buvo nusitaikyta labai energingais elektronais. Panašiai kaip Geigerio ir Marsdeno eksperimentas apšaudant atomus alfa dalelėmis pademonstravo, kad beveik visa atomo masė sukaupta mažame branduolyje, šie eksperimentai parodė, kad materijos tankio pasiskirstymas protone yra netolygus, vadinasi, jis gali būti sudarytas iš kelių mažesnių masių. Jos ir pasirodė besančios tie kvarkai.

Hadronų kvarkų modelis

Pagal pradinį, patį paprasčiausią kvarkų modelį, egzistuoja trys kvarkai. Jie vadinami **viršutiniu** (angliškai *up*, todėl žymimas raide **u**), **žemutiniu** (angliškai *down*, todėl žymimas raide **d**) ir **keistuoju** (angliškai *strange*, todėl žymimas raide **s**). Jų savybės pateiktos 26.7 lentelėje.

26.7 lentelė. **Pirmieji kvarkai**

Kvarkas	Simbolis	Krūvis (e)	Barijonų skaičius	Keistumas
Viršutinis	u	+2/3	1/3	0
Žemutinis	d	−1/3	1/3	0
Keistasis	s	−1/3	1/3	−1



26.12 pav. **Protono ir neutrono, kaip kvarkų sistemų, sandara**

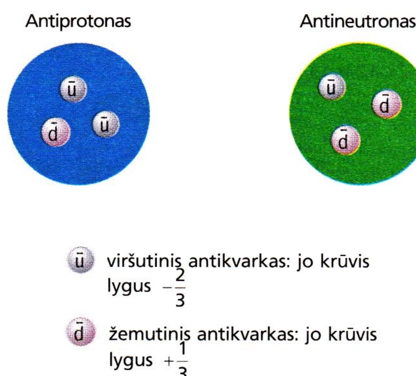
26.8 lentelėje ir 26.12 pav. matyti, kaip tie kvarkai yra pasiskirstę pačiuose paprasčiausiuose barijonuose – protone ir neutrone.

26.8 lentelė. **Kvarkai protone ir neutrone**

	Protonas	u	u	d	Neutronas	u	d	d
Krūvis	1	2/3	2/3	−1/3	0	2/3	-1/3	-1/3
Barijonų skaičius	1	1/3	1/3	1/3	1	1/3	1/3	1/3
Keistumas	0	0	0	0	0	0	0	0

Antikvarkai

Paaiškėjo, kad kvarkai taip pat turi antidaleles – **antikvarkus**, kurie yra būtini norint paaiškinti mezonų (vidutinės masės hadronų) egzistavimą. 26.9 lentelėje išvardyti trijų pirmųjų originaliųjų kvarkų antikvarkai, o 26.11 lentelėje atvaizduota, kaip iš jų derinių su kvarkais susidaro kai kurie mezonai. Antikvarkuose, palyginti su kvarkais, krūvis ir keistumas įgauna priešingus ženklus.



26.13 pav. **Antiprotono ir antineutrono, kaip kvarkų sistemų, sandara**

26.9 lentelė. **Trys pagrindiniai antikvarkai**

Antikvarkas	Simbolis	Krūvis (e)	Sukinys	Barijonų skaičius	Keistumas
Viršutinis	$\bar{u}$	−2/3	1/2	−1/3	0
Žemutinis	$\bar{d}$	+1/3	1/2	−1/3	0
Keistasis	$\bar{s}$	+1/3	1/2	−1/3	+1

Kvarkai barijonuose

26.10 lentelėje parodyta kai kurių barijonų, kaip kvarkų sistemų, sandara. Atkreipkite dėmesį, kad visi barijonai yra sudaryti iš kvarkų, o antibarijonai – iš antikvarkų. Kvarko barijonų skaičius lygus +1/3, o antikvarko –1/3; tai ir paaiškina, kodėl šių dalelių barijonų skaičiai lygūs tik +1 arba –1.

Dalelė	Protonas	Antiprotonas	Neutronas	Antineutronas	Lambda	Antilambda
Kvarkai	uud	$\bar{u}\bar{u}\bar{d}$	udd	$\bar{u}\bar{d}\bar{d}$	uds	$\bar{u}\bar{d}\bar{s}$
Krūvis	1	–1	0	0	0	0
Keistumas	0	0	0	0	–1	1

26.10 lentelė. **Kvarkai kai kuriuose barijonuose**

I Naudodamiesi 26.10 lentele paaiškinkite, kodėl:

a) antiprotonas turi neigiamą krūvį ir keistumą, lygų nuliui,

b) lambda dalelė turi krūvį, lygų nuliui, ir keistumą, lygų minus vienetui.

Kvarkas ir antikvarkas sudaro mezoną

Esminis skirtumas tarp mezonų ir barijonų (visi jie priklauso hadronų šeimai) yra tas, kad mezonų barijonų skaičius lygus 0. Tai lengvai paaiškinama, jei mezonai yra sudaryti iš kvarko ir antikvarko, kurių barijonų skaičiai yra priešingo ženklo ir pasinaikina, poros. 26.11 lentelėje parodyta kai kurių mezonų ir jų antidalelių kvarkų struktūra.

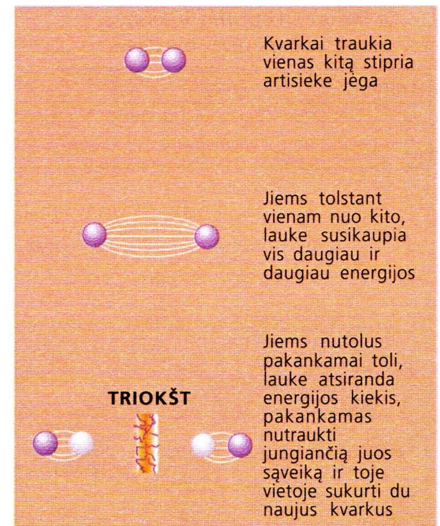
Mezonai	π^+	π^-	π^0	K^+	K^-	K^0	K^0 antikajonas	ϕ fi
Kvarkai	$u\bar{d}$	$\bar{u}d$	$u\bar{u}$	$u\bar{s}$	$\bar{u}s$	$d\bar{s}$	$\bar{d}s$	$s\bar{s}$

26.11 lentelė. **Kvarkai kai kuriuose mezonuose**

Lentelėje aiškiai matyti, kad π^- yra π^+ antidalelė, nes visi pirmosios *kvarkai* antrojoje yra pakeisti į atitinkamus *antikvarkus* ir atvirkščiai. Nesunku taip pat pastebėti, kad kai kurios dalelės yra savo pačių antidalelės, pavyzdžiui, π^0.

Kodėl neegzistuoja pavieniai kvarkai

Kvarkai yra „nematomi“, nes pavieniai egzistuoti negali. Jei tik pijono kvarkai nutolsta vienas nuo kito ir atsiranda pakankamai energijos, *susikuria du nauji kvarkai*, kurie su senaisiais sudaro jau du pijonus (26.14 pav.). Taigi nieko kito ir negalime pastebėti, kaip tik pijonus.



26.14 pav. **Kodėl niekada nepasirodo pavieniai kvarkai**

Daugiau kvarkų

Trijų kvarkų – antikvarkų porų, išvardytų 26.7 ir 26.9 lentelėse nepakanka aprašyti visų stebimų hadronų sandarai. Reikia daugiau kvarkų, ir šiuo metu žinoma jų šeima yra sudaryta nebe iš trijų, o iš šešių porų. Ji pateikta 26.12 lentelėje. Kaip jie buvo atrasti ir ištyrinėti, paaiškinsime vėliau.

Pavadinimas	Simbolis	Krūvis	Barijonų skaičius	Aromatas			
				Keistumas	Žavumas	Aukštumas	Žemumas
Kvarkai							
Viršutinis	u	+2/3	1/3	0	0	0	0
Žemutinis	d	–1/3	1/3	0	0	0	0
Keistasis	s	–1/3	1/3	–1	0	0	0
Aukščiausias	t	+2/3	1/3	0	0	1	0
Žemiausias	b	–1/3	1/3	0	0	0	1
Žavusis	c	+2/3	1/3	0	1	0	0
Antikvarkai							
Viršutinis	$\bar{u}$	–2/3	–1/3	0	0	0	0
Žemutinis	$\bar{d}$	+1/3	–1/3	0	0	0	0
Keistasis	$\bar{s}$	+1/3	–1/3	1	0	0	0
Aukščiausias	$\bar{t}$	–2/3	–1/3	0	0	–1	0
Žemiausias	$\bar{b}$	+1/3	–1/3	0	0	0	–1
Žavusis	$\bar{c}$	–2/3	–1/3	0	– 1	0	0

26.12 lentelė. **Visi kvarkai ir jų skaičiai**

J Naudodamiesi 26.12 lentele ir pateiktais dalelių duomenimis raskite jų kvarkų sudėtį:

Dalelė	Krūvis	Barijonų skaičius	Keistumas
Antiprotonas	–1	–1	0
Sigma minus 1	–1	+1	–
Chi minus	–1	+1	–2
Kajonas minus	–1	0	–1

6 TIKRAI FUNDAMENTALUS MODELIS (GALBŪT)

26.13 lentelė. **Leptonų ir kvarkų šeimos, žinotos 1974 metais**

Leptonai	Kvarkai
Q = −1 e^- μ^-	u ? Q = +2/3
Q = 0 ν_e ν_μ	d s Q = −1/3

Septintojo dešimtmečio pabaigoje galutinai patvirtinus kvarkų modelį, buvo pastebėta dar viena simetrija – šį kartą tarp kvarkų ir leptonų. Leptonai nėra sudaryti iš kvarkų, jie nedalūs, taigi kartu su kvarkais yra iš tikrųjų fundamentaliausi materijos elementai. 26.13 lentelėje išvardyti visi kvarkai ir leptonai, atrasti iki 1974 metų.

Lentelėje matyti, kad vienas langelis virš keistojo kvarko turėtų būti irgi užpildytas kažkokio tipo kvarku. Jo krūvis, kaip matyti, turėjo būti lygus +2/3, ir iš teorijos sekė, kad hadronai, į kurių sudėtį įeina tas kvarkas, turėtų turėti masę apie 3 GeV/c^2. Ir tikrai, 1974 metų pabaigoje iš karto dvi laboratorijos pranešė atradusios du naujus hadronus, pavadintus dži (J) ir psi (Ψ) dalelėmis. Netrukus paaiškėjo, kad tai yra ta pati dalelė, kurios masė lygi 3,1 GeV/c^2. Gana netikėtai, bet visai pagrįstai jai prigijo simbolis J/Ψ, tuo pačiu ir pavadinimas „džipsi", kas anglų kalba skamba kaip žodis „gipsy", reiškiantis „čigonę".

Į fiziką ateina žavumas

Fizikai gana greitai suprato, kad naujoji dalelė yra sunkusis mezonas, sudarytas iš atspėto trūkstamo lentelėje kvarko ir jo antikvarko. Nagrinėjant jo savybes paaiškėjo, kad tam kvarkui būtina priskirti naują krūvį, tenkinantį tvermės dėsnį. Tas krūvis buvo pavadintas „**žavumu**".

Taigi dalelės J/Ψ egzistavimas buvo nuspėtas, bet ją tyrinėjant buvo gauta įrodymų, kad turi egzistuoti dar viena nauja dalelė. Tai buvo naujas leptonas, bet nepaprastai masyvus; jo masė pasirodė maždaug du kartus didesnė už protono masę. Šis trečiasis leptonas buvo pavadintas **tau** ir pažymėtas atitinkama graikiška raide τ.

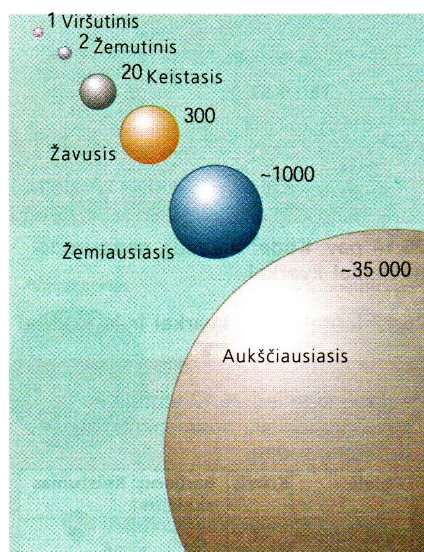
26.14 lentelė. **Leptonų ir kvarkų šeimos, žinotos 1975 metais**

Leptonai	Kvarkai
Q = −1 e^- μ^- τ	u c **aukščiausias?** Q = +2/3
Q = 0 ν_e ν_μ ν_τ	d s **žemiausias?** Q = −1/3

Šis atradimas sugriovė tuo metu jau atrodžiusį išbaigtą kvarkų ir leptonų sąrašą (dvi poros kvarkų, dvi poros leptonų). Pagal analogiją tai reiškė, kad turėtų egzistuoti dar viena kvarkų pora (26.14 lentelė).

Kvarkai aptinkami netiesiogiai, stebint daleles, kurių sudėtyje esantys naujieji kvarkai gali nulemti egzotiškas jų savybes. Fizikai pavadino tuos kvarkus **aukščiausiuoju** ir **žemiausiuoju** pagal jų padėtį lentelėje. Kaip jau įprasta, su kiekvienu nauju kvarku įvedamas ir naujas krūvis, tenkinantis krūvio tvermės dėsnį. Šiuo atveju tai buvo **aukštumas** ir **žemumas**.

Aukščiausias ir žemiausias kvarkai yra kur kas masyvesni už visus kitus (26.15 pav.), taigi ir sudarytos iš jų dalelės turi būti itin masyvios. Jiems sukurti reikalinga labai didelė energija, taigi naujas galingesnis dalelių greitintuvas. Tokiu aparatu – naujuoju protonų sinchrotronu, paleistu 1975 metais Kolumbijos universitete Niujorko valstijoje, kurio energija siekė 30 GeV, buvo gana greitai aptikta masyvi dalelė, kuri buvo žemiausiojo kvarko ir tokio pat antikvarko derinys. Šis naujasis mezonas buvo pažymėtas graikiška raide Y, ypsilon. Jo masė lygi 9,5 GeV/c^2.



26.15 pav. **Kvarkai yra įvairių dydžių. Aukščiausiasis kvarkas yra 10 000 kartų masyvesnis už viršutinį kvarką. Aukščiausiąjį kvarką buvo labai sunku atrasti**

Aukščiausiojo kvarko paieškos

Tobulai struktūrai betrūko tik aukščiausiojo kvarko. Buvo spėjama, kad jo masė turėtų būti didesnė nei 90 GeV/c^2, tai reiškia – daugiau kaip dvidešimt kartų didesnė už žemiausiojo kvarko masę. Dalelių, savo sudėtyje turinčių šiuos kvarkus, masė turėtų būti dar didesnė.

Tokias energijas galima sukurti tik priverčiant susidurti protonus su antiprotonais, pagreitintais galinguose sinchrotronuose. Įrodymas, kad tas kvarkas egzistuoja, buvo gautas tik po daugelio metų, 1994-ųjų balandį, kai buvo paleistas 1800 GeV tevatronas Fermi laboratorijoje (Čikaga, JAV). 1995 kovą buvo atlikti ir eksperimentai, kuriais įvertinta jo masė, kuri pasirodė beveik lygi 175 GeV/c^2.

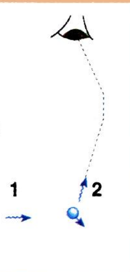
Neapibrėžtumo principas

Dalelių fizikos pagrindas yra neapibrėžtumas, būdingas visai kvantinei fizikai. Tai nėra mums įprasta neapibrėžtumo sąvoka; jis nėra sukeliamas ne visai tikslių fizikinių matavimų arba dėl to, kad naudojama technika nėra pakankamai tobula visoms kokio nors sudėtingo reiškinio parametrams išmatuoti.

1927 m. vokiečių fizikas V. Heizenbergas (*Werner Heisenberg*, 1901–1976) įrodė, kad egzistuoja esminis, nepriklausomas nuo prietaisų, neapibrėžtumas, atsirandantis matuojant bet kokios kvantinės dalelės, tokios kaip elektronas arba fotonas, padėtį arba judesio kiekį. Šis **neapibrėžtumo principas** pasirodė besąs fundamentali Visatos savybė.

Heizenbergas įsivaizdavo eksperimentą, kurio metu matuojama, pavyzdžiui, elektrono padėtis ir judesio kiekis. Tarkime, naudojamės kokiu „mikroskopu", kuris leidžia tą elektroną „pamatyti". Tai gali atsitikti tik todėl, kad fotonas, atsimušęs į elektroną, atskrieja į mūsų akį. Tačiau fotonas tuomet praranda kažkurią (nenuspėjamą) dalį savo judesio kiekio, kurią įgyja elektronas. Taigi elektrono charakteristikos matavimo metu taip pat nenuspėjamai pasikeičia, ir neįmanoma nusakyti, kokios jos buvo prieš tą susidūrimą.

Galima pabandyti sumažinti šį elektrono judesio kiekio neapibrėžtumą naudojant fotonus su labai mažu judesio kiekiu. Tačiau, kaip žinoma, fotonas yra ir banga, kurios plitimą erdvėje nusako jos ilgis λ. Elektrono koordinatė negali būti išmatuota tiksliau nei šis bangos ilgis, todėl kuo mažesnis yra fotono judesio kiekis, tuo didesnis jo bangos ilgis. Tai reiškia, kad net su mažo judesio kiekio, t. y. mažos energijos, fotonu, galime patikslinti elektrono judesio kiekio matavimo rezultatus, tačiau prarasti tikslumą nustatydami jo koordinates.



26.16 pav. **Menamasis Heizenbergo eksperimentas. Naudodami fotonų mikroskopą, bandote „pamatyti" elektroną. Kadangi fotonas turi judesio kiekį, susidūręs su elektronu jis priverčia šį pajudėti, taigi gali pasikeisti ir elektrono koordinatė, ir jo judesio kiekis. Dėl to negalime būti tikri, kur prieš susidūrimą tas elektronas buvo ir kokiu greičiu jis judėjo**

Krintančio fotono judesio kiekis yra h/λ, kur λ yra jo bangos ilgis, o h yra Planko konstanta, lygi $6{,}6 \times 10^{-34}$ (žr. 31 p.). Fotonas gali perduoti elektronui nors ir visą šį judesio kiekį, todėl elektrono judesio kiekio neapibrėžtumas po susidūrimo su šiuo fotonu sudaro:

$$\Delta p = h/\lambda$$

Kaip jau išsiaiškinome anksčiau, elektrono padėties neapibrėžtumas Δx yra tokios pat eilės, kaip ir fotono bangos ilgis, t. y. λ. Dėl to formulėje šį bangos ilgį galime pakeisti į Δx ir ją perrašyti taip:

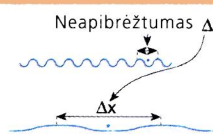
$$\Delta p\Delta x = \left(\frac{h}{\lambda}\right)\lambda = h$$

Tai yra didžiausias galimas bet kokių kvantinių matavimų tikslumas. Tenka susitaikyti su mintimi, kad jis gali būti ir dar didesnis, bet bent jau ne mažesnis už nustatytąją vertę, todėl rašoma, kad

$$\Delta p\Delta x \geq h \qquad [1]$$

Tai judesio kiekio ir koordinatės neapibrėžtumus siejanti formulė

26.17 pav. **Judesio kiekis, padėtis ir bangos ilgis**



(Šie Heizenbergo samprotavimai yra labai paprasti ir kartais gali būti ne visai tikslūs. Neapibrėžtumas vis tik atsiranda ne dėl matavimų netikslumo, – tai universali gamtos savybė, nepriklausanti nuo to, ar aprašome fotoną, ar elektroną, ar kosminį laivą, ar dar ką nors kita.)

Energijos ir laiko neapibrėžtumas

Egzistuoja ir fotono bei elektrono energijos neapibrėžtumas, nes abu jie turi ir bangų, ir dalelių savybių. Fotono energija išreiškiama paprastu sąryšiu $E = hf$.

Dabar pagalvokime, kokį rezultatą gausime matuodami šį dažnį, taigi ir energiją. Tarkime, mūsų dažnių matuoklis pakankamai jautrus atpažinti kiekvienai bangai, t. y. matuoti vieno herco (1 Hz) tikslumu. Jei bandome pamatuoti 1000 Hz bangos dažnį, tai per sekundę galime išmatuoti $f = (1000 \pm 1)$ Hz.

Taigi rezultato neapibrėžtumas yra $\Delta f = 1$.

Galime pagerinti tą rezultatą, tęsdami eksperimentą ne 1, o tarkime, 20 sekundžių, taigi matuodami 20 000 bangų.

Tokiu atveju rezultatas bus $f = (20\,000 \pm 1)/20$.

Tai reiškia, kad jo neapibrėžtumas yra $\Delta f = 1/20$.

Palyginkime: $\Delta t = 1$ atitiko ir $\Delta f = 1$. Tuo tarpu $\Delta t = 20$ atitinka $\Delta f = 1/20$.

Abiem atvejais: $\Delta f\Delta t = 1$. [2]

Tai galioja visada, nepriklausomai nuo eksperimento tikslumo.

Kaip žinoma, bet kokios dalelės, ne tik fotonai, turi ir bangų savybių, taigi ir jų energijos bei atitinkamų bangų dažniai susieti formule $E = hf$. Taigi galime parašyti: $\Delta f = \Delta E/h$.

Pasinaudoję [2] lygtimi gausime:

$$\Delta f\Delta t = \Delta E\Delta t/h = 1, \text{ arba } \Delta E\Delta t = h.$$

Vėlgi tai pats geriausias rezultatas, taigi bendrai paėmus, neapibrėžtumo principas energijai ir laikui formuluojamas šitaip:

$$\Delta E\Delta t \geq h. \qquad [3]$$

Vadinasi, norint kuo tiksliau išmatuoti energiją, matavimui reikia skirti kuo daugiau laiko.

7 YPATINGA NEAPIBRĖŽTUMO REIKŠMĖ

Neapibrėžtumo principas, aptartas praeitame puslapyje, turi ypatingą reikšmę dalelių fizikoje. Jis nurodo, kad labai trumpą laiką gali egzistuoti net ir labai didelis energijos kvantas, žinoma, *jei tik energijos ir laiko sandauga tai leidžia, t. y., jei ji yra mažesnė už Planko konstantos reikšmę*, kitaip sakant, jei $\Delta E \Delta t < h$.

Tai galioja ir materijai, kadangi energija ir masė yra lygiavertės. Taigi labai trumpą laiką gali egzistuoti ir dalelės. Šios dalelės yra vadinamos **virtualiosiomis**, nes jos gali atsirasti nepažeidžiant masės energijos tvermės dėsnio.

Ši neapibrėžtumo principo savybė yra itin reikšminga aprašant materijos prigimtį, ypač pradinėse Visatos evoliucijos stadijose.

?

K Elektrono masė–energija lygi $8{,}2 \times 10^{-14}$ J. Kaip ilgai tokios energijos dalelei leidžia gyvuoti neapibrėžtumo principas? Planko konstanta h lygi $6{,}6 \times 10^{-34}$ J · s.

8 BOZONAI, SĄVEIKOS AGENTAI

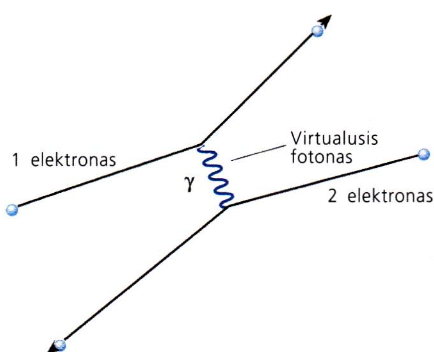
Būtent virtualiosiomis dalelėmis ir yra paremta kalibracinių bozonų, perduodančių sąveikas tarp dalelių, idėja.

Kadaise Niutonas labai išgyveno dėl savo sukurtos gravitacijos teorijos. Jis manė, kad ji nėra moksliškai pagrįsta, kadangi gravitacinė kūnų sąveika joje veikia ir *tuščioje* erdvėje, t. y. ten, kur nėra nieko, galinčio perduoti tą poveikį iš vienos masės kitai. Šiuolaikinė fizika irgi susidūrė su šia problema, tačiau dabar jau gerai žinoma, kad tą sąveiką perduoda *kitos dalelės*, ir yra žinoma, kokios dalelės kokią sąveiką perneša. Tai yra **pakaitinės dalelės, arba bozonai**. 26.3 lentelėje (251 p.) išvardyti bozonai, perduodantys keturias fundamentaliąsias sąveikas.

Fotonai

Geriausiai pažįstamas bozonas yra **fotonas**, perduodantis elektromagnetinę krūvininkų sąveiką.

Modelis to, kaip vienas elektronas, priartėjęs prie kito, jį veikia, parodytas 26.18 pav. Jis vadinamas Feinmano schema, taip pavadinta todėl, kad R. Feinmanas atrado šias schemas, iliustruojančias mainų, taigi ir sąveikos, procesus. Elektronams suartėjus, kiekvienas jų išspinduliuoja po fotoną, skirtą kitam. Kiekvienas fotonas turi judesio kiekį, todėl pakinta ir elektronų judesio kiekiai. Užregistravę šiuos pokyčius aiškiname juos kaip jėgos padarinį. Šiuo atveju jėgos sąvoka nėra labai naudinga; geriau jau būtų nagrinėti judesio kiekių pokyčius.



26.18 pav. **Feinmano schema, aprašanti dviejų elektronų sąveiką pasikeičiant virtualiuoju fotonu. Ši schema yra svarbiausia, bet ne vienintelė, aprašanti tą sudėtingą sąveiką**

Feinmano schema nėra fotografija to, kas vyksta iš tikrųjų sąveikaujant dviem elektronams; ji tik atspindi paprasčiausią, nors ir labai svarbią, šio proceso dalį.

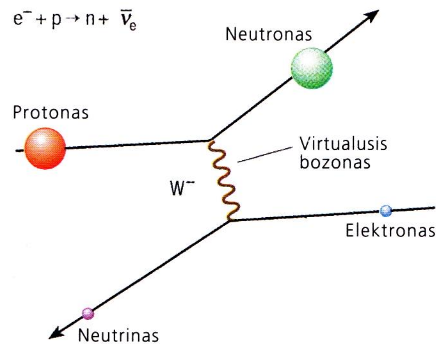
Netikėčiausia yra tai, kad šis fotonas iš tikrųjų niekuomet nėra stebėtas. Jis yra tarsi vaiduoklis, **virtualusis fotonas**, arba kažkas idealiai tinkamas neapibrėžtumo principui. Virtualiosios dalelės schemose vaizduojamos linijomis, kurios prasideda ir baigiasi susijungdamos su sąveikaujančių dalelių linijomis. „Realiųjų" dalelių linijos yra tos, kurios pažymėtos numeriais ir rodyklėmis; jos įeina į schemas iš išorės ir į išorę išeina po sąveikos.

Šiame modelyje krūvininkas vaizduojamas kaip dalelė, apsupta virtualiųjų fotonų debesėlio. Dalelėms suartėjus, jos pradeda mainytis tais fotonais. Tai sukelia dalelių judesio kiekių pokyčius, kurie stebimi kaip tų dalelių sąveikos jėgos. Jėga, kurią perduoda fotonai, gali sukelti ir dalelių trauką, ir jų stūmą.

W ir Z dalelės

Silpnąją sąveiką gali perduoti dviejų rūšių W dalelės ir Z dalelė. 26.19 pav. parodyta, kaip pakankamos energijos elektronui sąveikaujant su protonu atsiranda neutronas ir neutrinas.

Silpnosios sąveikos agentai gali būti aptikti branduolio išorėje. Skirtingai nuo fotonų, jie turi masę, lygią maždaug 90 GeV/c^2.



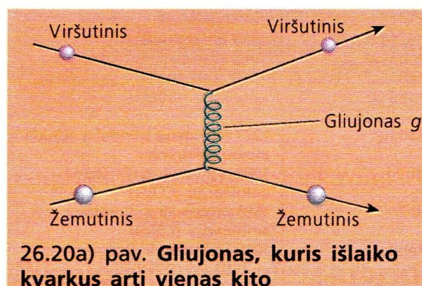
26.19 pav. **Didelės energijos elektronas pavirsta neutrinu, o tuo pat metu protonas virsta neutronu. Sąveiką šiuo atveju perduoda virtualusis bozonas (W^-), kuris gyvuoja pakankamai ilgai, kad atliktų visus šiuos darbus ($\Delta t = h/\Delta E$). Žiūrint diagramą iš kito galo, ji aprašo neutrono skilimą**

Gliujonai

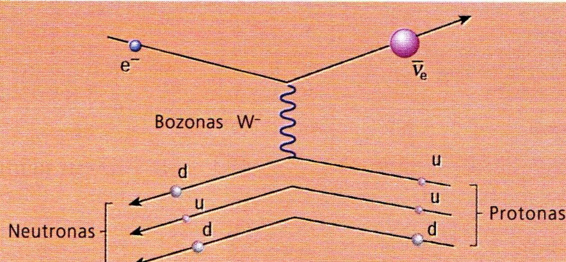
Gliujonai perduoda *stipriąją* kvarkų sąveiką. Jėgą, išlaikančią nukleonus branduolyje, sukuria gliujonai, dėl minėtų kvantinių priežasčių trumpam prasiskverbiantys iš vienos kvarkų sistemos (nukleono) į kitą nukleoną. Gliujonų masės lygios nuliui.

26.20a)–c) pav. parodytos trys Feinmano schemos, aprašančios kvarkų sąveiką. Turėkite omenyje, kad gliujonai visada sukelia tik *traukos jėgas*, tuo tarpu fotonai gali sukelti ir trauką, ir stūmą.

■ Žr. 14–17 klausimus.



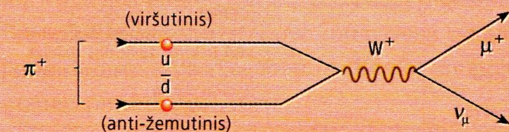
26.20a) pav. **Gliujonas, kuris išlaiko kvarkus arti vienas kito**



26.20b) pav. **Elektrono ir protono sąveika iš 26.19 pav. kvarkų lygmenyje. Protonas virsta neutronu, viršutiniam kvarkui pavirtus žemutiniu**

gliujonų simbolis

kitų bozonų simbolis



26.20c) pav. **Skylant teigiamo krūvio pijonui, jį sudaranti kvarkų pora virsta miujonu ir neutrinu, prieš tai pabuvusi virtualiuoju teigiamo krūvio bozonu**

Kvarkų skilimas

Mezonai yra sudaryti iš dalelės ir antidalelės, todėl gyvuoja trumpai. Pjonui skylant susidaro miujonas ir miujoninis neutrinas.Nei miujonai, nei neutrinai neturi savyje kvarkų, kadangi jie yra leptonai. „Kvarkiškumas“ vis tik išlieka, nes pijonas yra sudarytas iš kvarko ir antikvarko. Skilimui „tarpininkauja“ W^+ dalelė. Tai parodyta 26.20c) pav. Feinmano schemoje.

Neutronas taip pat skyla dėl silpnosios sąveikos, todėl jam irgi reikalingas „tarpininkas“, kuris šiuo atveju yra W^- dalelė. 26.19 ir 26.20 b) pav. parodytos dvi šio akto versijos, žinoma, jei nagrinėjate schemas iš dešinės į kairę. 26.20b) pav. parodytas procesas, kai žemutinis kvarkas virsta viršutiniu. „Kvarkiškumas“, o tuo pačiu ir barijonų skaičius, išlieka ir šiuo atveju.

?

L Pozitrono ir elektrono pora sąveikaudama gali pavirsti miujonų pora.

a) Parašykite reakcijos lygtį, turėdami omenyje, kad krūvis turi tenkinti tvermės dėsnį (Yra du galimi atsakymai).

b) Nupieškite tos reakcijos Feinmano schemą, jei jos metu sąveiką perduoda virtualusis Z bozonas.

Skylančios virtualiosios dalelės

Žiediniuose greitintuvuose susiduriant elektronams ir pozitronams atsiranda labai daug naujų dalelių. Jų atsiradimą lydi vienos arba daugiau virtualiųjų dalelių atsiradimas, kurios, nors ir nestebimos, yra galų gale atpažįstamos pagal skilimo produktus.

26.15 lentelė. Dalelių sąvadas

KLASĖ	Pavadinimas ir simbolis		Dalelės				Antidalelės				Masė (GeV/c²)	Pusėjimo trukmė (s)	Kada ir kur atrasta
	Savybės		Q	B	S	Kvarkų sudėtis	Q	B	S	Kvarkų sudėtis			
HADRONAI	protonas	p	+1	1	0	$\bar{u}\,\bar{u}\,\bar{d}$	−1	−1	0	$\bar{u}\,\bar{u}\,\bar{d}$	0,983	stabilus	1911–1919 alfa sklaida
	neutronas	n	0	1	0	$\bar{u}\,d\,\bar{d}$	0	−1	0	$\bar{u}\,d\,\bar{d}$	0,940	900	1932 berilio smūgiavimas alfa dalelėmis
Barijonai	lambda	Λ	0	1	−1	$\bar{u}\,\bar{d}\,\bar{s}$	0	−1	+1	$\bar{u}\,\bar{d}\,\bar{s}$	1,115	$2{,}6 \times 10^{-10}$	1951 kosminiai spinduliai
	sigma plius	Σ^+	+1	1	−1	$\bar{u}\,\bar{u}\,\bar{s}$	−1	−1	+1	$\bar{u}\,\bar{u}\,\bar{s}$	1,189	$0{,}8 \times 10^{-10}$	1953 kosminiai spinduliai
	sigma minus	Σ^-	−1	1	−1	$d\,\bar{d}\,\bar{s}$	+1	−1	+1	$d\,\bar{d}\,\bar{s}$	1,197	$1{,}5 \times 10^{-10}$	1953 greitintuvas
	sigma nulis	Σ^0	0	1	−1	$\bar{u}\,d\,\bar{s}$	0	−1	+1	$\bar{u}\,d\,\bar{s}$	1,192	6×10^{-20}	1956 greitintuvas
	chi minus	Ξ^-	−1	1	−2	$d\,\bar{s}\,\bar{s}$	+1	−1	+2	$d\,\bar{s}\,\bar{s}$	1,321	$1{,}6 \times 10^{-10}$	1952 kosminiai spinduliai
	chi nulis	Ξ^0	0	1	−2	$\bar{u}\,\bar{s}\,\bar{s}$	0	−1	+2	$\bar{u}\,\bar{s}\,\bar{s}$	1,315	3×10^{-10}	1959 greitintuvas
	omega minus	Ω^-	−1	1	−3	$\bar{s}\,\bar{s}\,\bar{s}$	+1	−1	+3	$\bar{s}\,\bar{s}\,\bar{s}$	1,672	$0{,}8 \times 10^{-10}$	1964 greitintuvas
	lambda žavusis	Λ_c	1	1	0	$\bar{u}\,\bar{d}\,\bar{c}$	−1	−1	0	$\bar{u}\,\bar{d}\,\bar{c}$	2,28	2×10^{-13}	1975 greitintuvas
Mezonai	Pi nulis	π^0	0	0	0	$u\,\bar{u}$ ar $d\,\bar{d}$	0	0	0	$\bar{u}\,u$ ar $\bar{d}\,d$	0,135	$0{,}8 \times 10^{-16}$	1949 greitintuvas
	pijonai	π^+, π^-	+1	0	0	$u\,\bar{d}$	−1	0	0	$\bar{u}\,d$	0,140	$2{,}8 \times 10^{-8}$	1947 kosminiai spinduliai
	K nulis	K^0	0	0	+1	$d\,\bar{s}$	0	0	−1	$\bar{d}\,s$	0,498	5×10^{-8}, 1×10^{-10}	1947 kosminiai spinduliai
	kajonas	K^+, K^-	+1	0	+1	$u\,\bar{s}$	−1	0	−1	$\bar{u}\,s$	0,494	$1{,}2 \times 10^{-8}$	1947 kosminiai spinduliai
	J/Psi	J/Ψ	0	0	0	$c\,\bar{c}$	0	0	0	$\bar{c}\,c$	3,1	10^{-20}	1974 greitintuvas
	D nulis	D^0	0	0	0	$c\,\bar{u}$	0	0	0	$\bar{c}\,u$	1,87	10^{-17}	1976 greitintuvas
	D plius	D^+	+1	0	0	$c\,\bar{d}$	0	0	0	$\bar{c}\,d$	1,87	4×10^{-13}	1976 greitintuvas
	upsilon	Y	0	0	0	$b\,\bar{b}$	0	0	0	$\bar{b}\,b$	9,46	10^{-20}	1977 greitintuvas
LEPTONAI	Elektronas, pozitronas,	e^-, e^+	−1	0	0	–	+1	0	0	–	0,00051	stabilus	e^- 1897 katodiniai spinduliai
	e^+1932 kosminiai spinduliai												
	miujonas	μ	−1	0	0	–	+1	0	0	–	0,1056	2×10^{-6}	1937 kosminiai spinduliai
	taujonas	τ	−1	0	0	–	+1	0	0	–	1,784	3×10^{-13}	1975 greitintuvas
	elektroninis neutrinas	ν_e	0	0	0	–	0	0	0	–	<50eV?	stabilus?	1956 branduolinis reaktorius
	miujoninis neutrinas	ν_μ	0	0	0	–	0	0	0	–	<0,5 MeV?	stabilus?	1962 greitintuvas
	tau neutrinas	ν_τ	0	0	0	–	0	0	0	–	<70 MeV?	stabilus?	kol kas nestebėtas
KALIBRACINIAI BOZONAI	fotonas	γ	krūvis		0						0	stabilus	1923 Rentgeno spindulių sklaida atomų elektronais
	W	W^+, W^-			+1, −1						83	10^{-25}	1983 protonų ir antiprotonų anihiliacija (CERN)
	Z	Z			0						93	10^{-25}	1983 protonų ir antiprotonų anihiliacija (CERN)
	gliujonas	g			0						0	stabilus	1979 elektronų ir pozitronų anihiliacija (DESY)
KVARKAI	viršutinis	u	krūvis		+2/3			barijonų skaičius		+1/3	~0,005		1964 (teorija). Stebėtas 1968–1972 sklaidant elektronus (Stenfordas), sklaidant neutrinus (CERN)
	žemutinis	d			−1/3					+1/3	~0,01		
	keistasis	s			−1/3					+1/3	~0,1		
	žavusis	c			+2/3					+1/3	~1,5		1974 turi egzistuoti, nes stebėta J/Psi ir kitos žaviosios dalelės
	žemiausiasis	b			−1/3					+1/3	~4,7		1977 turi egzistuoti, nes stebėta upsilon dalelė
	aukščiausiasis	t			+2/3					+1/3	~175		1994–1995

9 SUBATOMINIŲ DALELIŲ APTIKIMO IR ATPAŽINIMO BŪDAI

Įprastas būdas aptikti materijos dalelių masę arba krūvį pagrįstas tuo, kad elektringoji dalelė, judanti statmenai magnetinio lauko B krypčiai, yra veikiama jėgos, kuri statmena ir jos judėjimo krypčiai, ir magnetiniam laukui. Belieka tik prisiminti, kad jėga, veikianti stačiu kampu į dalelės greičio vektorių, priverčia ją judėti apskritimu.

Trajektorijos apskritimo spindulys r gali būti panaudotas rasti dalelės krūvio ir masės santykiui, nes jei žinomas dalelės greitis, tai jos

$$Q/m = v/Br$$

26.21 pav. parodytos trajektorijos, kuriomis juda dalelės jų detektoriuje, šiuo atveju – **burbuliukų kameroje** (264 p.). Trajektorijos yra taip iškreiptos, kad dalelės, turinčios teigiamą krūvį, pasisuka į vieną, o turinčios neigiamą krūvį – į priešingą pusę.

Šiais laikais didelėse fizikos laboratorijose tokias nuotraukas analizuoja kompiuteriai. Dalelių trajektorijos nėra stebimos nei akimi, nei

Žr. 18–21 klausimus. ■

?

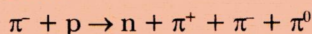
M Nurodykite magnetinio lauko, elektrono greičio ir atstojamosios jėgos, veikiančios elektroną, vektorius, ir paaiškinkite, kaip visa tai priverčia elektroną judėti magnetiniame lauke išilgai apskritimo lanko.

Kvarkai ir silpnoji sąveika

Kad būtų aiškiau, jums teks prisiminti dalelių kvarkų sudėtį, pateiktą 26.15 lentelėje.

Kai reakcija vyksta veikiant silpnajai sąveikai, *visada* pakinta kvarko rūšis. Silpnoji sąveika yra vienintelė, kuri sukelia tokį pokytį. Visais kitais atvejais, kai atsiranda nauji kvarkai, jie sudaro kvarkų ir antikvarkų poras, išlaikydami nepakitusį pilnąjį „kvarkiškumą“. Tai yra tiesiog kitas būdas pasakyti, kad barijonų skaičius tokiose reakcijose išlieka nepakitęs, nes kvarko barijonų skaičius lygus 1/3, o antikvarko jis yra –1/3.

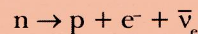
Pavyzdžiui, tokios reakcijos, vykstančios veikiant *stipriajai* sąveikai:



$$\pi^- + p \rightarrow n + \pi^+ + \pi^- + \pi^0$$

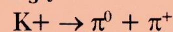
kvarkų sudėtis kairiojoje pusėje yra ($\bar{u}$d) ir (uud). Dešiniojoje pusėje turime (udd), (u$\bar{d}$), ($\bar{u}$d) ir (u$\bar{u}$). Dešinėje pusėje kvarkų daugiau, bet jie pasirodo kvarko ir antikvarko poromis, tai yra u$\bar{u}$ ir d$\bar{d}$. Jeigu kiekvieną kvarką skaičiuojame kaip +1, o antikvarką – kaip –1, tai ir dešinėje, ir kairėje turime po 3.

Geriausiai žinoma reakcija, kurią sukelia **silpnoji sąveika**, yra neutrono skilimas:



$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

Čia kairiojoje pusėje turime kvarkus (udd). Dešiniojoje esantis protonas sudarytas iš kvarkų (uud). Taigi kvarkiškumas arba barijonų skaičius abiejose pusėse toks pat, tik žemutinis kvarkas yra pasikeitęs į viršutinį. Gal tai ir atrodo nežymus pasikeitimas, bet panagrinėkime reakciją



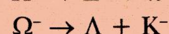
$$K+ \rightarrow \pi^0 + \pi^+$$

Kairėje pusėje esantis K^+ turi kvarkus u$\bar{s}$. Dešinėje π^0 turi arba (u$\bar{u}$), arba (d$\bar{d}$), o π^+ turi (u$\bar{d}$). Kvarkų sudėties požiūriu π^0 yra tarsi pats pasinaikinantis, tačiau atsirandant π^+ *keistasis* kvarkas pavirsta *žemutiniu* antikvarku. *Tai pagrindžia žinomą faktą, kad keistumo tvermė išlieka stipriosios sąveikos sukeliamose reakcijose, bet gali pakisti reakcijose, kurias sukelia silpnoji sąveika.*

Kita vertus, jei tik kokios reakcijos metu pasikeičia kvarko rūšis, galima drąsiai teigti, kad ta reakcija yra sukelta silpnosios sąveikos. Patikrinkite, kad nurodyti skilimai yra būtent jos sukelti:



$$\Omega^- \rightarrow \Xi^0 + \pi^-$$



$$\Omega^- \rightarrow \Lambda + K^-$$

netgi fotografuojamos. Elektronika jas atpažįsta ir siunčia tiesiai į analizuojantį kompiuterį.

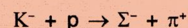
Pirmieji dalelių detektoriai

Vienas pirmųjų dalelių detektorių buvo **burbuliukų kamera** (daugiau informacijos galite rasti 61 p.). Kitas pigiausias detektorius yra **fotografinė plokštelė**. Abu jie buvo intensyviai naudojami penktajame ir šeštajame dešimtmetyje pigiausiam didelių energijų dalelių šaltiniui – kosminiams spinduliams – tirti.

Geigerio ir Miulerio (GM) skaitiklis aprašytas 62 p. Tokių skaitiklių sistema gali būti panaudota dalelių trimatėms trajektorijoms nustatyti. Šis principas dabar taikomas pačiose moderniausiose dalelių registravimo sistemose, aprašytose 264 p.

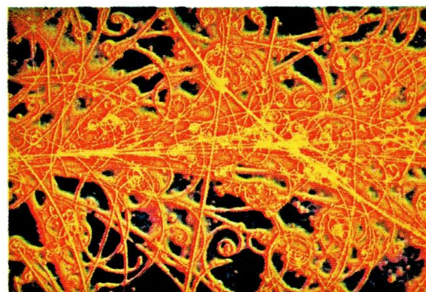
?

N Patikrinkite, ar kvarkiškumas yra toks pat abiejose šios reakcijos pusėse:



$$K^- + p \rightarrow \Sigma^- + \pi^+$$

Ar reakcijos metu išlaikoma keistumo tvermė?



26.21 pav. **Nuotrauka iš burbuliukų kameros, kurioje iškreiptos visų krūvininkų trajektorijos**

?

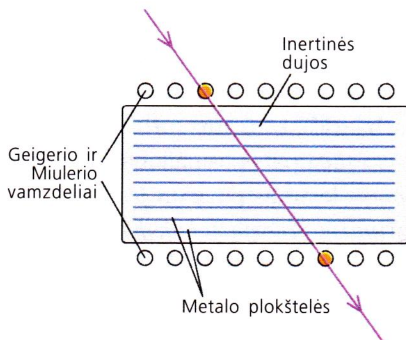
O Nurodykite fizikines priežastis reiškinių, kad: **a)** masyvesnės dalelės, **b)** turinčios mažesnį krūvį dalelės juda magnetiniame lauke didesnio spindulio apskritimų lankais.

Šiuolaikiniai dalelių detektoriai
1 Burbuliukų kamera

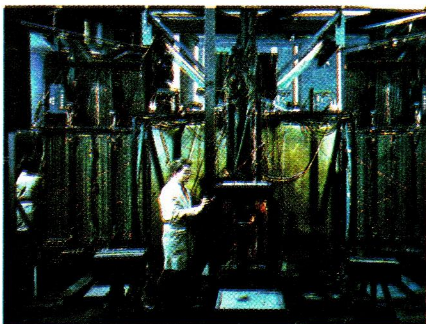
Burbuliukų kamerą, kuri buvo pagrindinis dalelių tyrimo įrankis 6-ajame ir 7-ajame dešimtmetyje, sudaro indas, pripildytas „perkaitinto“ skysto vandenilio. Skystasis vandenilis yra suslėgtas lygiai tiek, kad būtų ties virimo slenksčiu. Bent kiek pakitus slėgiui, vandenilis užverda, ir pradeda susidaryti burbuliukai, panašiai kaip atidarius indą su putojančiu gėrimu.

Reikia tik kad kas nors tą virimą, panašiai kaip vandens lašelių susidarymą Vilsono kameroje, paskatintų. Tai gali būti bet kokia dalelė, judanti skystyje ir jį jonizuojanti. Toje vietoje, kur susidaro jonas, atsiranda ir šiek tiek burbuliukų, rodančių to jono, o tuo pačiu ir dalelės, buvimo vietą, o ilgainiui – ir judėjimo trajektoriją. Indą veikia stiprus magnetinis laukas, todėl krūvininkai juda jame lankais. Kai kurių dalelių trajektorijos tokioje kameroje parodytos 26.21 pav.

Burbuliukų kameros trūkumas yra tas, kad dalelių pėdsakai susidaro tik tada, kai slėgis joje bent kiek pakinta. Tą slėgio redukciją reikia atlikti *prieš pat* įlekiant į kamerą dalelei, ir todėl, jei jos atlėkimas nelauktas, ta dalelė gali būti nepastebėta. Kita vertus, pralėkus dalelei, slėgį reikia vėl padidinti, kad virimas vėl kurį laiką nevyktų. Visas šis slėgio kaitaliojimas trunka apie sekundę, o tai dalelių fizikoje yra labai ilgas laikas, neatitinkantis šiuolaikinių reikalavimų tokiems detektoriams.



26.22a) pav. **Kibirkštinė kamera. GM vamzdeliai veikia kaip „sutapimų" detektoriai. Dalelė, lėkdama pro vieną jų kiekvienoje eilėje, priverčia pradėti veikti šią kamerą**



26.22b) pav. **Veikianti CERN kibirkštinė kamera**

Žr. 22 klausimą.

Detektavimo pagreitinimas

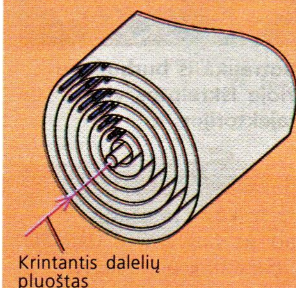
Kibirkštiniai detektoriai buvo pagaminti tam, kad būtų galima išvengti minėto atsitiktinio registravimo ir ilgo burbuliukų kamerų relaksacijos laiko. Šios **kibirkštinės kameros** yra sudarytos iš plonų metalo lakštų, išdėstytų nedideliais atstumais vienas nuo kito, kaip parodyta 26.22a) pav. Krūvininkui judant šioje kameroje, dujos išilgai jos kelio yra jonizuojamos.

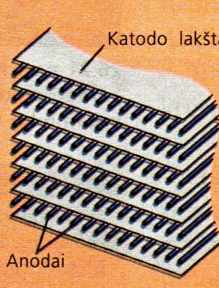
Abiejose kameros pusėse yra išdėstomi Geigerio ir Miulerio vamzdeliai, kurie užfiksuoja dalelės įlėkimą į kamerą ir tuo pat metu įjungia tarp plokštelių aukštą įtampą. Jonai, susidarę prie dalelės kelio, pradeda judėti, sukeldami iškrovą tarp plokštelių. Tuo pat metu atsidaro kameros diafragma ir iškrovos pėdsakai nufotografuojami. Tai galima pamatyti 26.22 b) pav. Iškrova labai greitai išstumia iš kameros susidariusius jonus, taigi išjungus įtampą kamera jau pasirengusi sekančiai registracijai.

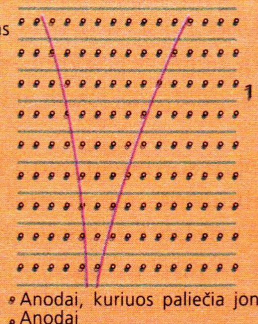
2 Daugialaidės kameros

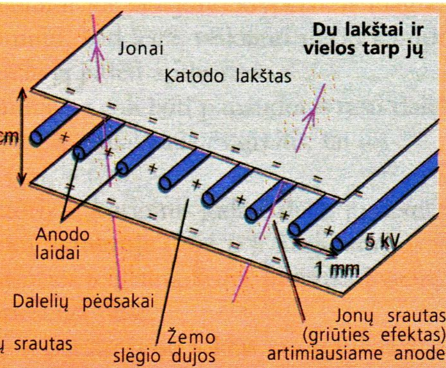
Daugialaidės kameros yra kibirkštinių kamerų patobulintas variantas, kuriame plokštelės pakeičiamos daugeliu plonų vielų. Dalelės trajektorija atkuriama pagal jonus, susidariusius judant jai tarp artimiausių vielų. Vielos sudėliotos arti, jos yra įelektrintos ir tiesiogiai sujungtos su kom-

26.23 pav. **Daugialaidės kameros sudėtinės dalys. Detektoriai sudedami arba eilėmis, arba cilindrais, tarp kurių yra laidai, kad būtų galima atkurti trimatę dalelės trajektoriją**



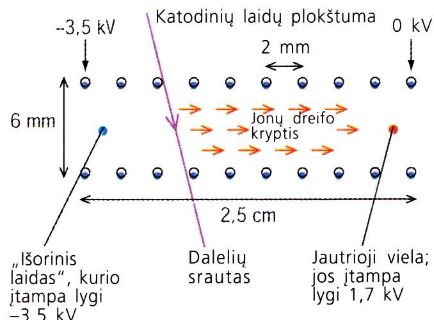






piuterio įrašymo sistema. Jos veikia panašiai kaip labai daug Geigerio ir Miulerio vamzdelių, sudėtų į vieną didelį vamzdį.

Patobulintos yra ir pačios daugialaidės kameros. Jos vadinamos dreifo kameromis (26.24 pav.). Jautrios yra tik atskiros vielos, o jonai juda link jų veikiami elektrinio lauko, kurį sukuria kitos detektoriuje esančios vielos. Jonų dreifo greitis yra žinomas, ir kompiuteriui nesunku rasti jų koordinates apskaičiavus laiką, kurį jie sugaišta dreifuodami link jautriųjų vielų.

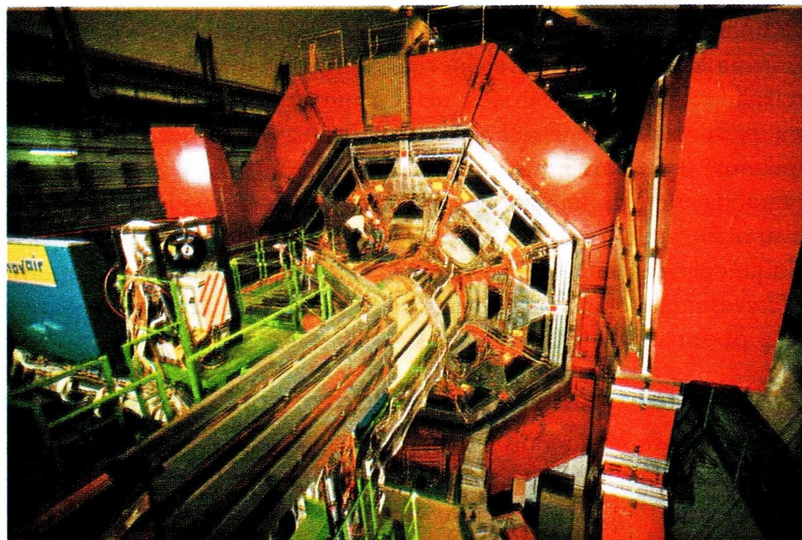


26.24 pav. **Vienas iš daugelio jautriųjų dreifo kameros elementų. Kintamoji katodo vielų įtampa verčia jonus dreifuoti pastoviu greičiu prie jautriųjų vielų. Įskriejusi dalelė įjungia laiko matavimo sistemą, kad pagal laiką, kurį jonai užtrunka dreifuodami link jautriųjų vielų, būtų apskaičiuota jų trajektorija**

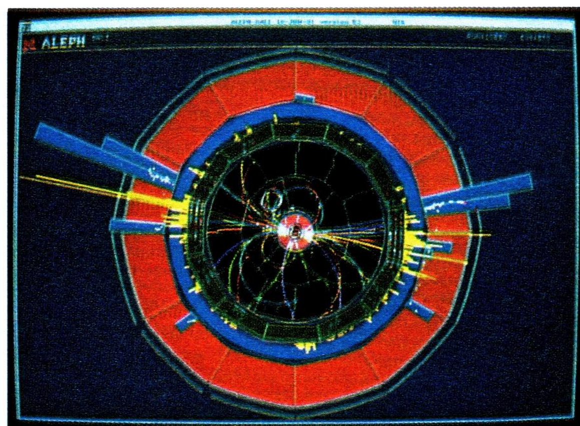
3 Visuotinio detektavimo sistemos

Moderniausia šiuolaikinė detektavimo sistema yra LEP (Large Electron-Positron) kolaiderio detektorius. Jame tą sritį, kurioje vyksta didelių energijų dalelių susidūrimai ir gimsta visokios kitos dalelės, supa keleto skirtingų rūšių detektoriai. Duomenys iš detektorių patenka į kompiuterį, kuris atkuria trajektorijas. Gaunamas toks išsamus vaizdas, kad galima tą reakciją tarsi apžiūrėti iš įvairių pusių. Sistema palygina kiekvieną trajektoriją su žinomų dalelių paliekamais pėdsakais, todėl lengvai aptinka kiekvieną naują dalelę, dar neužfiksuotą jos atmintyje. Eksperimentas, kuriame naudojamas šis detektorius, užtrunka vos apie milijoną-ją sekundės dalį, ir jo metu susidaro apie milijonas dalelių, taigi tik visiškai automatizuota sistema gali analizuoti tokį eksperimentą.

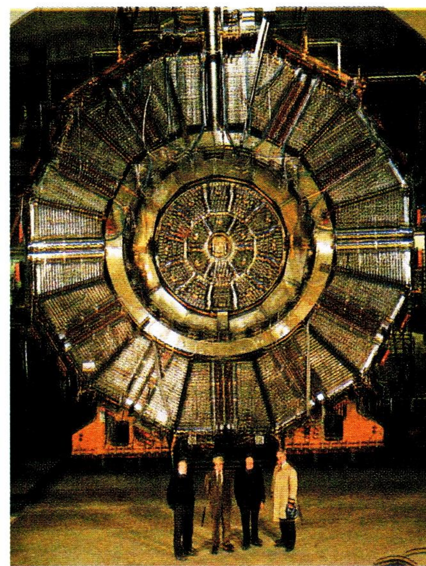
Šių CERN detektorių išdėstymą apie mažą kamerą, kurioje vyksta tie susidūrimai, galite pamatyti 26.26b) pav.



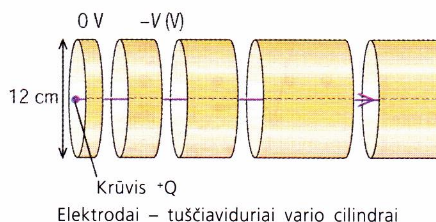
26.25 pav. **CERN'o 27 km ilgio greitintuvo (LEP) pluoštelis vamzdžiu, kuris matyti pirmame plane, atskrieja į dalelių detektorių L3. Detektoriaus durelės atviros. Priešinga detektoriaus pusė matyti 26.26b) pav.**



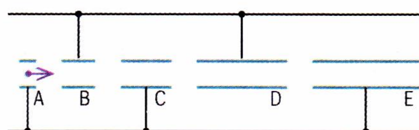
26.26a) pav. **Vaizdas, sukuriamas detektoriaus ALEPH kompiuteryje po to, kai duomenys apie Z^0 bozono skilimą į kvarko ir antikvarko porą pasiekia detektavimo sistemą**



26.26b) pav. **Taip atrodo CERN'o detektorius ALEPH su nuimtu dangčiu. Dalelių susidūrimai vyksta centrinėje jo dalyje, kuri yra apjuosta įvairiausiomis detektavimo sistemomis**



26.27a) pav. **Linijinio greitintuvo, tokio kaip esantis Stenfordo linijinio greitintuvo centre (LAC), dalis. Krūvininkas pagreitinamas lauke, susidarančiame tarp elektrodų. Jis įgauna kinetinę energiją, lygią pralėktam potencialų skirtumui**



26.27b) pav. **Dalelė linijiniame greitintuve juda nuo vieno elektrodo prie kito. Įtampų skirtumas tarp elektrodų A ir B, B ir C ir taip toliau yra toks pat, taigi dalelė nuolatos greitėja. Kodėl kiekvienas sekantis elektrodas yra ilgesnis už prieš jį buvusį?**



26.28 pav. **Trijų kilometrų ilgio pastatas Kalifornijoje, Stenfordo LAC, kuriame įrengtas linijinis greitintuvas**

10 ŠIUOLAIKINIAI DALELIŲ GREITINTUVAI

Šiuolaikiniai dalelių greitintuvai būna trijų rūšių: linijiniai, ciklotronai ir sinchrotronai.

1 Linijiniai greitintuvai

Linijiniame greitintuve dalelės pagreitinamos joms judant išilgai tiesaus tunelio. Tunelyje sukuriamas vakuumas; jame vienas už kito išdėlioti anodai, kuriuose sukuriamas judamas pagreitinantis laukas, kaip parodyta 26.27a) ir b) pav. Jie pigesni už greitintuvus, kuriuose dalelės juda lankais, nes nereikia nukreipimo magnetų, ir kainą iš esmės lemia apvijų ir specialaus plieno, reikalingo elektromagnetams, kaina.

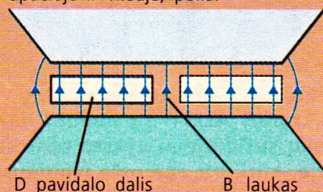
Galingiausias linijinis greitintuvas yra Kalifornijoje, Stenfordo LAC. Jo ilgis lygus 3 kilometrams; elektronai jame įgyja iki 50 GeV energijas. Elektronai į greitintuvą pakliūva iš katodo spiralės, panašiai kaip televizoriuje. Greitintuve jie pralekia 100 000 elektrodų grandinę. Elektronai, praskriejęs pro vieną elektrodą, pakliūva į kitą, kurio šiek tiek didesnė įtampa, įjungiama būtent tuo metu. Taip elektronai įgreitinami iki greičių, artimų šviesos greičiui. Elektrodų įtampą reguliuoja aukšto dažnio radijo signalai, pasiekiantys reikiamus elektrodus būtent reikiamu metu ir šiek tiek pakeliantys jų įtampą palyginti su anksčiau pralėkto elektrodo įtampa. Elektronai tarsi slysta išilgai šios radijo bangos.

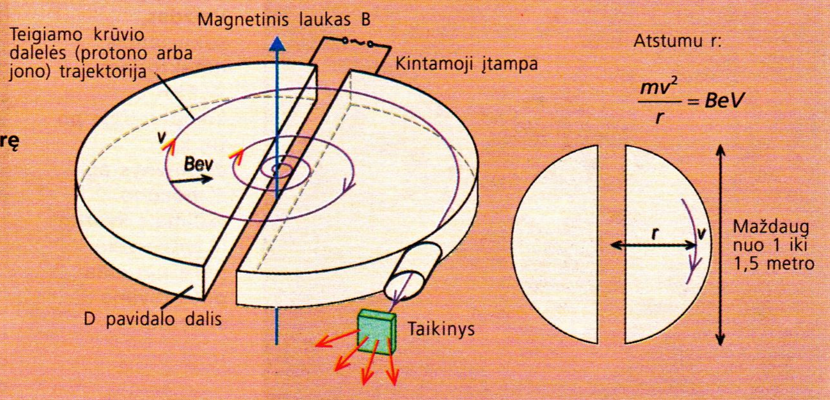
Linijiniai greitintuvai yra ne tik pigesni už žiedinius, bet ir gerokai efektyvesni už juos, kai greitinami yra būtent elektronai. Tai sąlygoja vadinamasis *sinchrotroninis spinduliavimas*. Jis atsiranda visada, kai krūvininkai juda kreiva trajektorija, nes norint išlaikyti juos orbitoje, reikalingas įcentrinis pagreitis, netgi ir tuo atveju, kai jie juda apskritimu pastoviu greičiu. Todėl, veikiant įcentriniam pagreičiui, taigi ir atitinkamai jėgai, krūvininkai spinduliuoja fotonus ir todėl jie nuolatos praranda energiją. Tai ypač būdinga elektronams, nes jų krūvis, palyginti su mase, yra labai didelis, ir todėl judėdami apskritimais dideliu greičiu jie dėl šio spinduliavimo praranda labai daug kinetinės energijos. Masyvesnėms tokios pat absoliučios krūvio vertės dalelėms, tokioms kaip protonai, šis efektas yra kur kas silpnesnis.

2 Žiediniai greitintuvai – ciklotronai

Ciklotronuose magnetinis laukas priverčia daleles judėti iškreiptomis trajektorijomis (26.29 pav.). D pavidalo dalių įtampa nuolatos kinta, todėl dalelės, praskriedamos iš vienos D pavidalo dalies į kitą, yra kaskart pagreitinamos.

26.29 pav. **Ciklotronas. Kiekvienos D pavidalo dalies potencialas kinta, todėl teigiamo krūvio dalelė nuolatos traukiama nuo vieno elektrodo prie kito, jos greitis vis didėja, ir ji juda spirale, besivejančia nuo centro į išorę**





Kadangi dalelių greičiai nuolatos auga, jos juda spiralėmis į išorę. Maksimali energija priklauso nuo to, kiek kartų dalelė gali apsisukti prieš išskriedama į ciklotrono išorę. Šiuo metu ciklotronų pagaminamos energingos dalelės yra naudojamos medicinos tyrimuose, taip pat naujų šiuolaikinių medžiagų tyrimuose.

3 Sinchrotronai

Judančių dideliais greičiais, artimais šviesos greičiui, dalelių masės dėl reliatyvumo teorijos nusakomų efektų labai išauga. Dėl to ilgiau trunka ir jų apsisukimai ciklotrone, taigi jas greitinanti kintamoji įtampa ima darytis nesinchronizuota.

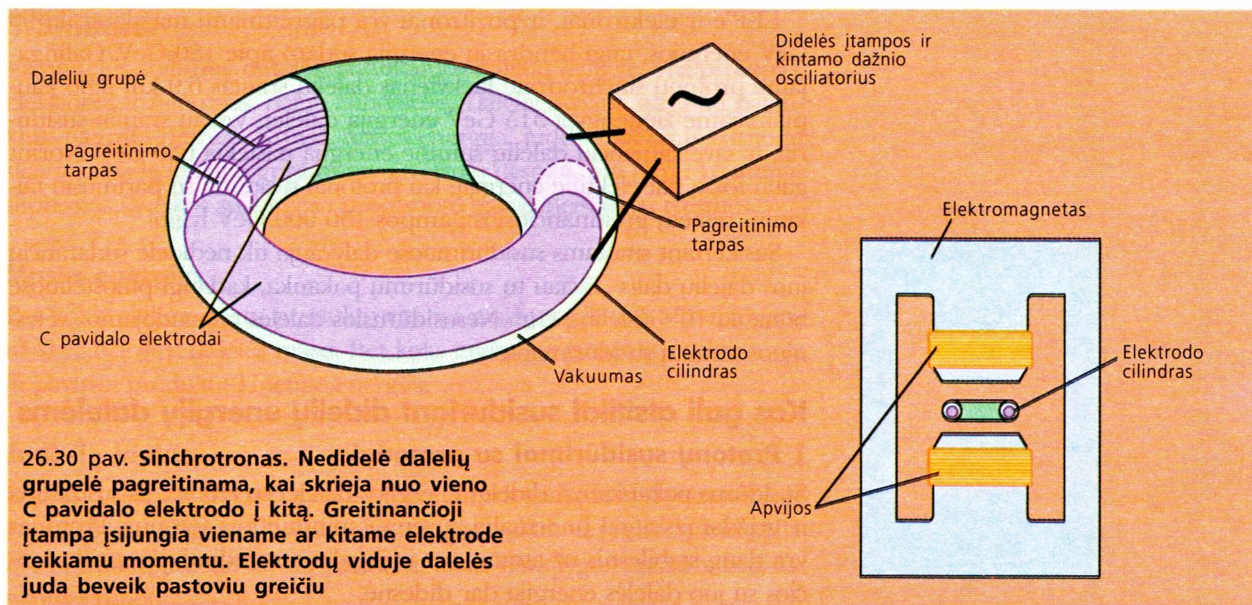
Sinchrotronuose ši problema yra išspręsta, juose kintamąją įtampą pavyksta suderinti su ilgesniu apskriejimo laiku. Galų gale, kai dalelių greitis pasidaro labai artimas šviesos greičiui, jis didėja itin lėtai, ir apskriejimo laikas beveik nekinta. Dalelių judesio kiekis ir energija auga toliau, bet ne dėl to, kad didėja jų greitis, o todėl, kad toliau didėja jų masė. Būtent į šį reiškinį ir atsižvelgta konstruojant sinchrotroną.

Tai išties labai didelis prietaisas. Dalelės jame greitinamos panašiai kaip linijiniuose greitintuvuose, skriedamos tuščiaviduriuose anodų cilindruose, bet jų trajektorijos yra apskritimai. Dalelės tuose sinchrotronų **kaupimo žieduose** priverčiamos judėti pastovaus spindulio apskritimais, taigi jų trajektorijos nepriklauso nuo greičio.

Prieš pakliūdamos į sinchrotroną dalelės yra pagreitinamos nedideliuose linijiniuose greitintuvuose arba ciklotronuose iki greičių, artimų šviesos greičiui. Sinchrotrone jos išlaikomos pastoviose orbitose veikiant stipriais magnetiniais laukais, kurių stipris didėjant jų kinetinei energijai nuolatos auga.

Daugelis pačių naujausių duomenų apie elementariąsias daleles gauta naudojant **supersinchrotronus.** Tai išties milžiniško skersmens įrenginiai, o labai stiprūs magnetiniai laukai sukuriami elektromagnetuose, kurių vijos laikomos superlaidumą palaikančioje temperatūroje, nes tik tokiomis sąlygomis pavyksta išvengti jų kaitimo ir tuo pačiu – didelių energijos nuostolių.

■ Žr. 24 klausimą.



26.30 pav. Sinchrotronas. Nedidelė dalelių grupelė pagreitinama, kai skrieja nuo vieno C pavidalo elektrodo į kitą. Greitinančioji įtampa įsijungia viename ar kitame elektrode reikiamu momentu. Elektrodų viduje dalelės juda beveik pastoviu greičiu

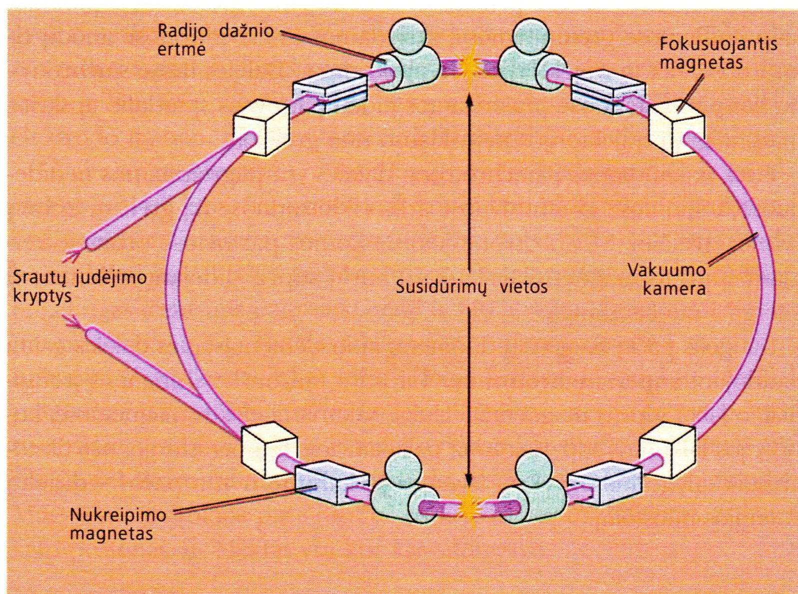
11 TAIKINIAI IR SUSIDŪRIMAI

Parimę ir judantys taikiniai

Tiriant subatomines daleles reikia labai didelės energijos. Susidūrimų metu išsiskirianti energija virsta įvairių dalelių srautais. Kuo didesnė susidūrimo metu atsiradusi dalelės masė, tuo didesnę energiją turi atsinešti susidurianćiosios dalelės, taigi tuo didesnė turi būti jas greitinanti įtampa.

Aštuntojo dešimtmečio pabaigoje CERN'o fizikai sugalvojo, kaip paprastu būdu padidinti tų susidūrimų energiją. Mat tuo metu, kai susiduria dvi priešingomis kryptimis judančios dalelės, bendra kinetinė energija esti dvigubai didesnė nei susiduriant atskriejančiajai dalelei su parimusia. Šiuo principu dabar naudojamasi **didžiajame elektronų ir pozitronų kolaideryje (LEP – Large Electron–Positron collider)**, parodytame 26.31a) pav., taip pat CERN'o **galingajame protonų sinchrotrone**, kur yra pagreitinami ir po to susiduria protonai ir antiprotonai.

Jėgos, naudojamos dalelėms pagreitinti ir jų trajektorijoms iškreipti, veikia vienodai ir daleles, ir antidaleles, jei dalelės juda viena, o antidalelės – priešinga kryptimi.



26.31a) pav. **CERN'o dalelių fizikos Europos laboratorijos, esančios netoli Ženevos, LEP (Didžiojo elektronų ir pozitronų) kolaiderio magnetų ir greitinančiųjų elektrodų išdėstymo schema**



26.31b) pav. **Vaizdas iš viršaus į CERN žiedus. LEP kolaiderio ilgis yra 27 km. Mažesnysis apskritimas žymi vietą, kur yra galingas protonų sinchrotronas**

LEP'e ir elektronai, ir pozitronai yra pagreitinami maždaug iki 90 GeV energijos, taigi bendra jų energija sudaro apie 180 GeV. Galingajame protonų sinchrotrone kiekvienas dalelių srautas 6,9 km ilgio kaupiamajame žiede įgyja 315 GeV energiją dalelei. Vėliau srautai susiduria, ir sąveikaujančių dalelių suminė energija pasiekia 630 GeV. Norint gauti tokią pat efektinę energiją, kai protonai susiduria su parimusiu taikiniu, reikėtų greitinančiosios įtampos 150 000 GeV lygio!

Susikertant srautams susidūrimuose dalyvauja tik nedidelė sudarančių juos dalelių dalis. Tačiau tų susidūrimų pakanka, kadangi pluošteliuose būna iki 10^{14} dalelių į cm^3. Nesusidūrusios dalelės panaudojamos vėlesniuose srautų susidūrimuose.

Kas gali atsitikti susiduriant didelių energijų dalelėms

1 Protonų susidūrimai su protonais

Susidūrus pakankamai didelės energijos dalelei su atomu, jis susižadina ir grįždamas atgal į normalią būseną išspinduliuoja fotonus. Protonas yra daug stabilesnis už atomą, bet ir jį galima sužadinti, jei susiduriančios su juo dalelės energija dar didesnė.

Sužadintas protonas po labai trumpo laiko išspinduliuoja **pijonus**. Priešingai nei fotonai, pijonai yra nestabilūs ir labai greitai, po kokių 10^{-8} s, skyla į miujoną ir neutriną. Miujonas (milžiniškas elektronas) skyla kiek lėčiau, po 2×10^{-6} s, į elektroną ir neutriną. Neutrinai toliau neskyla, jie yra stabilūs, todėl Visata yra tiesiog užpildyta jais – maždaug tūkstantis milijardų (10^{12}) šių dalelių, judančių šviesos greičiu, kas sekundę perskrodžia ir jūsų kūną.

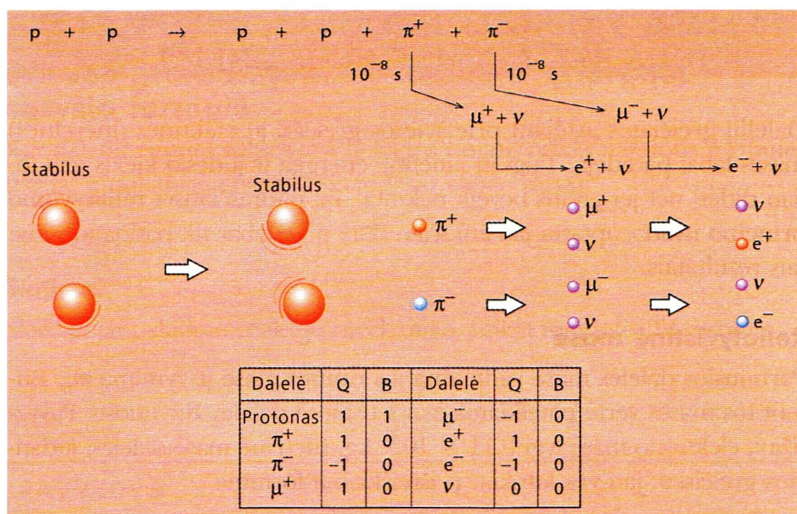
26.32 pav. matyti, kas atsitinka įvykus paprastam nedidelės energijos dviejų protonų susidūrimui. 26.33 pav. galima įsitikinti, kas atsitinka kiek padidėjus susidūrimo energijai – jo metu lyg kažkam sprogus atsiranda labai daug pijonų porų.

?

P Naudodamiesi duomenimis, pateiktais 26.32 pav., įsitikinkite, kad:

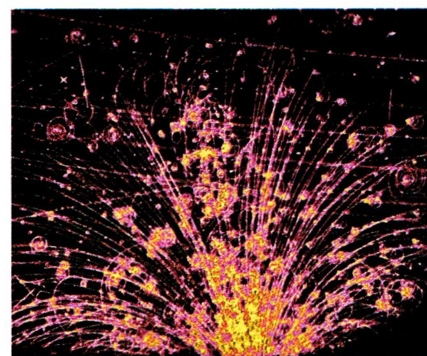
a) krūvis tenkina tvermės dėsnį,

b) barijonų skaičius tenkina tvermės dėsnį.



Dalelė	Q	B	Dalelė	Q	B
Protonas	1	1	μ^-	–1	0
π^+	1	0	e^+	1	0
π^-	–1	0	e^-	–1	0
μ^+	1	0	ν	0	0

26.32 pav. **Paprastas susidūrimas, turintis pakankamai energijos, kad jo metu susidarytų dvi naujos dalelės**



26.33 pav. **Dalelių pėdsakai burbuliukų kameroje. Pijonų pėdsakai išsiskiria, kiekvienam poros nariui nukrypstant į kitą pusę. Spiralės rodo elektronus arba pozitronus**

2 Protonų ir antiprotonų susidūrimai

Susidūrus protonui su antiprotonu, jis anihiliuoja, tai yra susikompensuoja, kaip ir kitos dalelės ir antidalelės. Išsiskirianti energija nėra lygi tik jų kinetinių energijų sumai – tai taip pat ir jų masių energija. Deja, dalelių, judančių labai dideliais greičiais, artimais šviesos greičiui, kinetinės energijos yra tokios didelės palyginti su jų masių energijomis, kad pastarosios dažniausiai yra iš viso ignoruojamos.

3 Skilimai

Vienintelės **stabilios dalelės**, sutinkamos dalelių fizikoje, yra protonas, elektronas ir neutrinas, bei jų antidalelės. Dalelei skylant, turi būti patenkinti tvermės dėsniai. Krūvis, masės energija, judesio kiekis ir barijonų skaičius visada tenkina griežtus savo tvermės dėsnius, tuo tarpu keistumas silpnosios sąveikos sukeltuose procesuose gali ir neišlaikyti tvermės.

Masės energija

Bet kokio skilimo metu produktų rimties masių suma turi būti mažesnė už skylančiosios dalelės masę. Bet koks energijos perteklius tokiu atveju pavirsta produktų kinetine energija.

Judesio kiekis

Paprastų skilimų metu paprastai daroma prielaida, kad skylanti dalelė yra parimusi, taigi jos judesio kiekis lygus nuliui. Tai reiškia, kad skilimo produktų judesio kiekių vektoriai, kurie nėra lygūs nuliams, turi susikompensuoti.

Kodėl stabiliosios dalelės yra stabilios

Stabiliosios dalelės yra stabilios todėl, kad nėra mažesnės masės dalelių, į kurias jos galėtų skilti nesutrikdydamos tvermės dėsnių. *Nėra jokio barijono, kurio masė būtų mažesnė už protono masę*, taigi jis pasmerktas būti stabilus. Jis galėtų skilti į pijonus, energijos tvermės dėsnis tokiu atveju būtų išlaikytas, tačiau šį skilimą draudžia barijonų skaičiaus tvermės dėsnis (pijonai yra mezonai, kurių barijonų skaičius lygus nuliui). Panašiai elektronai negali skilti į neutrinus, nes tokio skilimo metu negali būti išlaikytas krūvio tvermės dėsnis. (Grįžkime į 26.15 lentelę, kurioje yra pateiktas dalelių sąvadas).

Žr. 23 klausimą. ■

13 MASĖ, ENERGIJA IR LAIKAS, KAI DALELĖS JUDA RELIATYVISTINIAIS GREIČIAIS

Dalelių greičiams artėjant prie šviesos greičio, jų efektinės (inercinės) masės labai padidėja. Taigi jų kinetinė energija ir judesio kiekis gali toliau didėti net jei greitis beveik nekinta. Tai paprasčiausia **reliatyvumo principo** išvada, aptarta jau anksčiau (225 p.). Dabar tik pasinaudosime tais rezultatais.

Reliatyvistinė masė

Parimusios dalelės masė vadinama jos rimties mase ir žymima m_0. Būtent tos masės vertė pateikiama įvairiausiuose dalelių žinynuose. Pavyzdžiui, elektrono masė lygi $9{,}11 \times 10^{-31}$ kg. Inercinė masė dalelės, judančios greičiu v, jau yra kitokia. Ji išreiškiama formule

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} = m_0\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}} = m_0\gamma$$

Čia γ yra Lorenco daugiklis (žr. 232 p.).

?

Q Naudodamiesi masės ir greičio sąryšiu, skaičiuokliu apskaičiuokite, kiek kartų padidėja dalelės masė jai judant greičiu, lygiu $0{,}99c$.

Energija ir judesio kiekis, kai greitis yra artimas šviesos greičiui

Didelių energijų fizikoje energija ir **judesio kiekis** p yra glaudžiai susiję. Dalelės **pilnoji** reliatyvumo teorijoje visada lygi $E = mc^2$. Čia m yra reliatyvistinė masė: $m = E/c^2$. Dalelės, kuri juda greičiu v, judesio kiekis lygus mv, taigi:

$$p = mv = Ev/c^2$$

arba:

$$E = pc^2/v \qquad [1]$$

Kai dalelės greitis v beveik lygus šviesos greičiui c,

$$E = pc \text{ ir } p = E/c \qquad [2].$$

Judesio kiekio vienetai

Iš [2] lygties aišku, kad:

judesio kiekio vienetas = energijos vienetas/šviesos greitis

Lygiai kaip dalelių fizikai matuoja dalelių mases GeV/c^2 vienetais, jie ir judesio kiekius matuoja panašiais vienetais, lygiais GeV/c.

[2] lygtyje nepaisoma dalelės rimties masės energijos, lygios m_0c^2. Fotonams tai nesudaro keblumų, nes jų rimties masė lygi nuliui.

PAVYZDYS

K CERN'o elektronų ir pozitronų kolaideryje dalelės įgyja energijas, lygias 50 GeV. Kelių procentų paklaida atsiranda skaičiuojant padarius prielaidą, kad jų rimties masė lygi nuliui?

A Elektrono rimties masė:

$$\text{elektrono masė} \times (\text{šviesos greitis})^2$$
$$= 9{,}1 \times 10^{-31}\ \text{kg} \times (3 \times 10^8)^2\ \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$$
$$= 8{,}2 \times 10^{-14}\ \text{J}$$

Elektronvoltas lygus $1{,}6 \times 10^{-19}$ J, todėl rimties masės energija

$$= (8{,}2 \times 10^{-12})/(1{,}6 \times 10^{-19})$$
$$= 5{,}1 \times 10^5\ \text{eV} = 0{,}51\ \text{MeV} = 0{,}000\ 51\ \text{GeV}$$

Taigi paklaida procentais sudaro = 0,000 51/50 × 100 = 0,001%.

Masyvios dalelės, judančios greičiais, artimais šviesos greičiui: judesio kiekio ir energijos sąryšio formulė

Kai dalelių rimties masės yra nelygios nuliui, reikia naudotis formule, tiksliai nusakančia energijos ir judesio kiekio sąryšį:

$$E^2 = p^2c^2 + m_0^{\,2}c^4 \qquad [3]$$

[3] formulė irgi yra reliatyvistinė. Jei norite sužinoti, kaip ji išvedama, atsiverskite 25 klausimą.

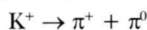
Skilimai

Skaičiuojant skilimo reakcijų mechaniką, reikia naudotis [3] formule.

PAVYZDYS

Kajono skilimas

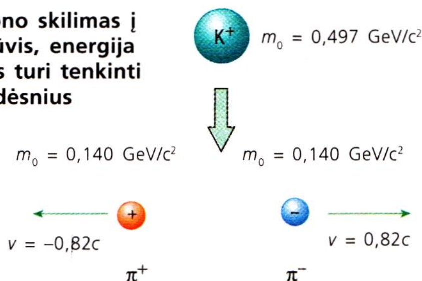
K Teigiamo krūvio kajonas po maždaug 10^{-8} s skyla:



$$K^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^0$$

Kokią energiją turi ir kokiu greičiu juda atsiradę pijonai?

A Tarkime, kajonas skilimo momentu buvo parimęs. Jo rimties masė lygi 0,497 GeV/c^2. Ši kajono masės energija po skilimo pavirsta produktų (dviejų pijonų, kiekvienas po 0,140 GeV/c^2) rimties energija plius jų kinetinės energijos.



26.34 pav. **Kajono skilimas į du pijonus. Krūvis, energija ir judesio kiekis turi tenkinti savo tvermės dėsnius**

Pijonų masės yra lygios, todėl ir kajono energiją jie pasidalija lygiomis dalimis. Judesio kiekis skilimo metu turi išlikti nepakitęs, todėl pijonų judesio kiekių suma yra lygi nuliui. Vadinasi, jų judesio kiekiai turi būti vienodi, tik priešingų krypčių. Taigi po skilimo atsiradę pijonai nuskrieja į priešingas puses vienodais greičiais.

Kiekvienam pijonui tenka energija = 0,497/2
= 0,249 GeV.

Pasinaudoję judesio kiekio ir energijos sąryšio formule galime rasti pijono judesio kiekį:

$$E^2 = p^2c^2 + m_0^{\,2}c^4$$

Pertvarkę gausime: $p^2c^2 = E^2 - m_0^{\,2}c^4$

Taigi: $p^2 = E^2/c^2 - m_0^{\,2}c^2$

Kiekvieno pijono rimties masė lygi 0,140 GeV/c^2.

Taigi: $p^2 = [(0{,}249\ \text{GeV})^2/c^2] - [(0{,}140\ \text{GeV}/c^2)^2 \times c^2]$
$= (0{,}249^2)\ (\text{GeV}^2/c^2) - (0{,}140^2)\ (\text{GeV}^2/c^4) \times c^2$

Galų gale: $p^2 = 0{,}0422\ (\text{GeV}/c)^2$

Taigi $p = 0<205\ \text{GeV}/c$

Patarimas! Būkite atidūs pasirinkdami vienetus – geriausia jų stengtis išvengti, kaip ir padaryta šiame pavyzdyje. Jeigu jums reikėtų padalyti ar padauginti iš 9 × 10^{16}, tai jau kažkas negerai.

Kokie puikūs yra pasirinkti vienetai, galite įsitikinti nustatę kiekvieno pijono greitį pagal 270 puslapyje pateiktą [1] formulę:

$$E = \frac{pc^2}{v}$$

Iš čia:

$$v = \frac{pc^2}{E} = 0{,}205 \times \frac{\text{GeV}}{\text{c}} \times c^2 \times \frac{1}{0{,}249\ \text{GeV}} = \frac{0{,}205c}{0{,}249} = 0{,}82c.$$

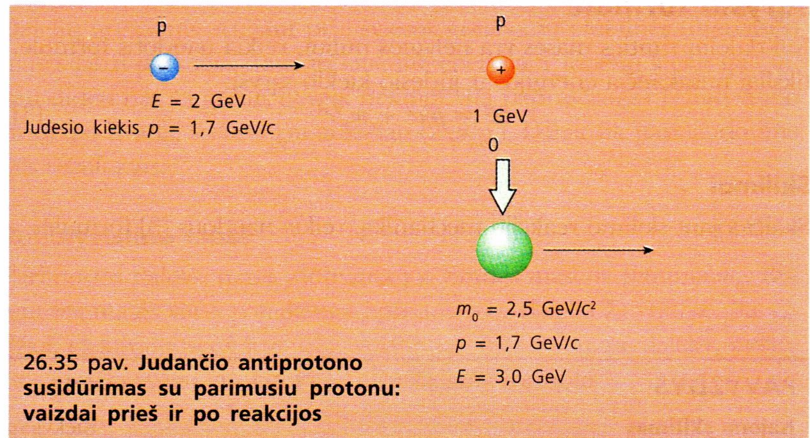
Susidūrimai

Susidūrimų metu naujosios dalelės nusineša kinetinę energiją ir savo masės energiją. Šias energijas joms atiduoda susiduriančiosios dalelės.

Panagrinėkime du atvejus, kai susidūrime dalyvauja protonas ir antiprotonas. Pirmuoju atveju atskriejantis antiprotonas susiduria su parimusiu protonu. Antruoju atveju abi dalelės susiduria judėdamos vienodais greičiais, bet priešingomis kryptimis. Tarkime, pilnoji kiekvienos dalelės energija lygi 2 GeV. Tegul ir pirmuoju, ir antruoju atveju susidūrimo metu susidaro viena dalelė. Kokia bus jos pilnoji energija?

1 Susidūrimas su parimusiu taikiniu

Šiuo atveju judantis antiprotonas turi 2 GeV dydžio pilnąją energiją, o parimusio energija yra lygi jo masės energijai, t. y. maždaug 1 GeV. Iš viso bus 3 GeV (26.35 pav.).



26.35 pav. Judančio antiprotono susidūrimas su parimusiu protonu: vaizdai prieš ir po reakcijos

Judesio kiekis prieš susidūrimą lygus antiprotono judesio kiekiui, taigi

$$p^2 = \frac{E^2}{c^2} - m_0^{\ 2}c^2$$

Tai yra:

$$p^2 = 3\left(\frac{\text{GeV}}{c}\right)^2$$

Arba

$$p = 1{,}7 \text{ GeV}/c$$

Naujoji dalelė turi turėti būtent šį judesio kiekį. Kad būtų patenkinta [3] lygtis (žr. 271 p.), tos dalelės rimties masė turi būti lygi:

$$m_n^2 = \frac{E^2}{c^4} - \frac{p^2}{c^2}$$

$$= 3^2\left(\frac{GeV}{c^2}\right) - 1{,}7^2\left(\frac{GeV}{c^2}\right)^2$$

Taigi

$$m_n = 2{,}5\; GeV/c^2 \quad .$$

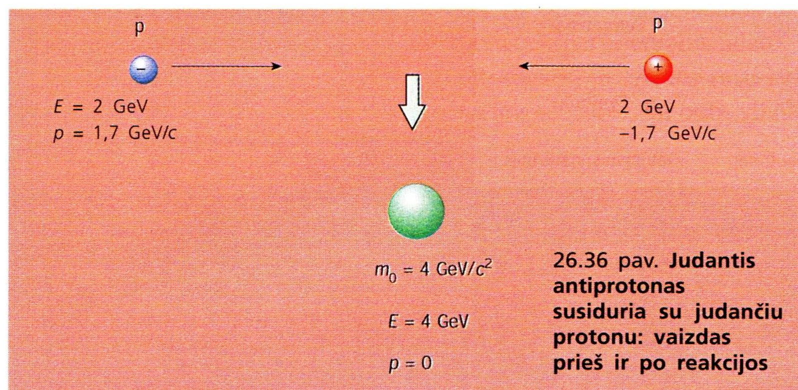
Tai yra maždaug lygu Z dalelės masei.

Žr. 26–29 klausimus. ■

Susidūrimai kolaideryje

Jei susiduriančiųjų kolaideryje dalelių energijos yra 2 GeV, tai iš viso gauname 4 GeV. Pilnasis judesio kiekis prieš susidūrimą lygus nuliui, kadangi abi dalelės juda tokiu pat greičiu, tik priešingomis kryptimis. Naujosios dalelės judesio kiekis taip pat turi būti lygus nuliui. Tai reiškia, jos *kinetinė energija lygi nuliui*, ir visa susiduriančiųjų dalelių energija suvartojama naujosios dalelės masės energijai, kuri lygi 4 GeV.

Taigi kolaiderio sistema įgalina sukurti didesnės rimties masės daleles nei tradicinė sistema, paremta susidūrimu su parimusia dalele.



26.36 pav. **Judantis antiprotonas susiduria su judančiu protonu: vaizdas prieš ir po reakcijos**

Pagrindinės reliatyvistinio judėjimo formulės

Lorenco daugiklis $\gamma = \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}}$

Reliatyvistinė masė $m = \gamma m_0$

Pilnoji energija, lygi kinetinei energijai plius rimties energija

$E = E_k + E_0$

Judesio kiekis $p = mv = Ev/c^2$

Pilnoji energija $E = mc^2$

Energijos ir judesio kiekio ryšio formulė

$E^2 = p^2c^2 + m_0^2c^4$

Laiko pailgėjimas $\Delta t^0 = \gamma \Delta t$

14 LAIKO PAILGĖJIMAS

Miujono pusėjimo trukmė lygi apie 2×10^{-6} s $= \Delta t$. Tai reiškia, kad po tokio laiko miujonų pluoštelyje pusė jų jau turėtų būti suskilę. Praėjus maždaug 10^{-5} s, suskilę jau beveik visi pluoštelio miujonai.

Miujonas, atsirandantis kosminių spindulių sukeliamose arba greitintuvuose vystančiose reakcijose, juda greičiu, labai artimu šviesos greičiui. Taigi per tą laiką jis gali nuskrieti atstumą, lygų $c\Delta t$:

$$\text{atstumas, nuskriejamas iki suskilimo} = 2{,}2 \times 10^{-6}\ \text{s} \times 3 \times 10^{8}\ \text{m} \approx 700\ \text{m}$$

R Kosminių spindulių liūtyje susidaro apie 80 miujonų. Kiek jų suskils praėjus laikui, lygiam keturioms miujono pusėjimo trukmėms?

„Ilgai gyvuojantys" miujonai

Eksperimentai su kosminiais spinduliais parodė, kad nors susidūrimai, kurių metu susidaro miujonai, vyksta atmosferoje maždaug 10 km aukštyje, prie Žemės paviršiaus stebima labai daug miujonų. Kodėl jie taip toli nuskrieja?

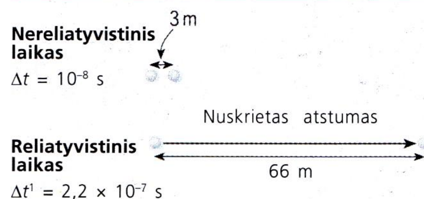
Atsakymą duoda specialioji reliatyvumo teorija. Judančiame miujone laiko intervalas pailgėja ir tampa lygus:

$$\Delta t_0 = \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \gamma \Delta t$$

Taigi miujonas, judantis greičiu, lygiu 0,99*c*, gyvuoja beveik septynis kartus ilgiau nei tada, kai jis būna parimęs. Dėl to ir nesuspėja suskilti taip aukštai atmosferoje susidarę miujonai.

Šis laiko pailgėjimas leidžia aptikti daleles, kurių gyvavimo trukmė dar mažesnė (nuo 10^{-10} s iki 10^{-20} s), detektoriuose, įtaisytuose kelių metrų atstumu nuo jų susidarymo vietos (26.37 pav.).

S Raskite miujono, judančio 0,99*c* greičiu, gyvavimo laiką.



26.37 pav. **Laiko intervalo pailgėjimo efektas, kai dalelė juda greičiu, lygiu 0,999c. Dalelė, kurios gyvavimo laikas lygus 10^{-8} s, judėdama šiuo greičiu, gali nuskrieti apie 3 m. Reliatyvistinis laiko pailgėjimas padidina jos gyvavimo laiką iki $2{,}2 \times 10^{-7}$ s, taigi iš tiesų ji nuskrieja 66 m**

Kaip nūnai atrodo materija

26.16 lentelėje parodytos dvi šeimos, kvarkai ir leptonai, ir trys jų kartos. Kiekviena dalelė turi antidalelę. Iš jų sudaryta visa materija ir antimaterija, kokią tik iki šiol pavyko stebėti. Deja, didesnė Visatos dalis gali būti sudaryta iš **juodosios materijos**, kuri iki šiol dar nėra atpažinta.

Masės didėjimo kryptis →

KVARKAI	Viršutinis Žemutinis	Žavusis Keistasis	Aukščiausiasis Žemiausiasis	Iš jų sudaryti hadronai; jie patiria stipriąją branduolinę sąveiką
LEPTONAI	Elektronas Elektroninis neutrinas	Miujonas Miujoninis neutrinas	Taujonas Taujoninis neutrinas	Išlieka pavieniai ir nepatiria stipriosios branduolinės sąveikos
	⇧ Šie sudaro įprastą materiją	⇧ Kam egzistuoja šie – neaišku		

26.16 lentelė. Kvarkai ir leptonai

Galų gale ...

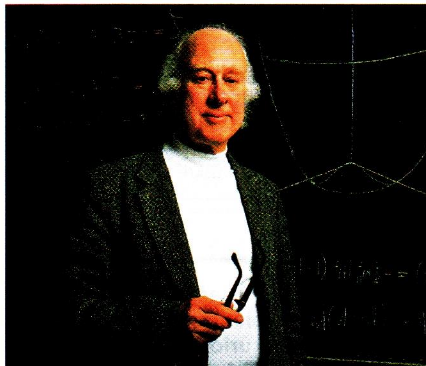
Atomai ir jų branduoliai egzistuoja todėl, kad jie yra sudaryti iš dalelių (atome – elektronų, branduolyje – nukleonų), kurių kiekviena, būdama šios sistemos dalimi, *privalo turėti jai vienai būdingą būseną, aprašomą kvantinių skaičių rinkiniu, besiskiriančiu nuo kitos tokios pat dalelės, esančios toje pat sistemoje, kvantinių skaičių rinkinio.*

Šiame skyriuje išsiaiškinome, kad dalelių savybes ir jų elgesio taisykles lemia fundamentaliosios kvarkų savybės. *Deja, niekas nežino, kodėl šios kvarkų savybės yra būtent tokios, o ne kitokios.*

Egzistuoja daugybė skirtingų dalelių, bet jos atsiskleidžia tik labai specifinėmis sąlygomis – esant didžiulėms energijoms, tokioms kaip susidūrimų greitintuvuose metu arba žvaigždėse, arba Didžiojo sprogimo metu. Didžioji Visatos dalis šiuo požiūriu yra gana skurdi, ji sudaryta beveik vien tik iš protonų, neutronų ir elektronų.

Visai nesuprantama kol kas yra dalelių masės prigimtis. Yra manoma, kad atsakyti į šį klausimą būtų galima atradus **Higso bozoną**. Šis išgalvotas bozonas turėtų, kaip mezonai, perduoti kažkokį lauką ir atitinkamą jėgą, sukuriančią **mases**.

Masė mūsų stebėjimuose pasireiškia kaip tam tikra dalelių savybė, trukdanti jas pagreitinti. Kuo sunkiau pagreitinti kokią dalelę, tuo didesnė yra jos masė, ir atvirkščiai. Tačiau prisiminkite, kaip sunku yra pajudinti aliuminio ploštelę, esančią stipriame magnetiniame lauke (žr. 1-os d. 270 p.). Visada tokiu atveju atsiranda jėga, besipriešinanti jūsų pastangoms. Nesunku ją paaiškinti – laidininkui judant magnetiniame lauke, jame susidaro daug mažų sūkurinių srovių, kurių sukuriami magnetiniai laukai, sąveikaudami su išoriniu lauku, būtent ir apsunkina šį judėjimą. Jei nežinotumėte apie šį efektą, toks eksperimentas tikriausiai sukeltų įspūdį, kad dėl nežinomų priežasčių magnetiniame lauke labai padidėja tos aliuminio plokštelės inercija, taigi ir jos masė. Panašiai **Higso laukai** priešinasi pakaitinių virtualiųjų bozonų, perduodančių įvairiausias sąveikas (daug kartų aptartas pavyzdys – fotonai, perduo-

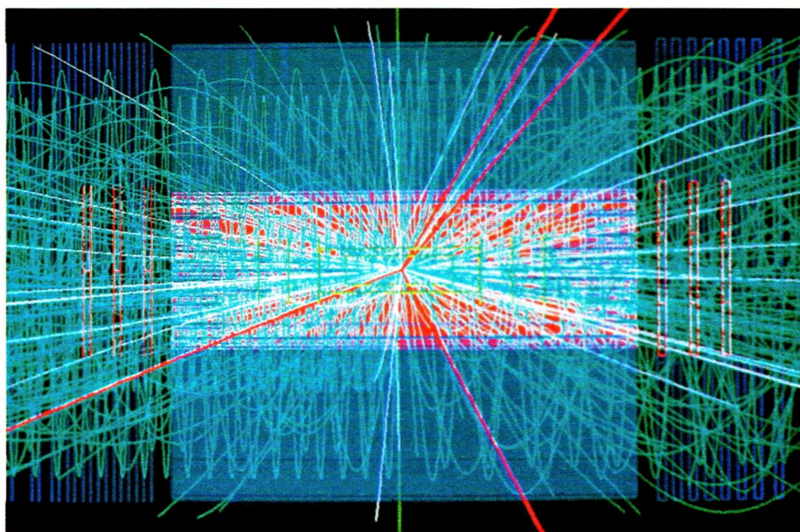


26.38 pav. **P. Higsas (*Peter Higgs*), kurio teorija bandoma suvienyti elektromagnetinę, silpnąją ir stipriąją sąveikas**

dantys elektromagnetinę sąveiką), judėjimui. Sukuriamas efektas yra ekvivalentus kažkokiai naujai sąveikai, skatinančiai inercinį pasipriešinimą judėjimui. Galima įsivaizduoti Higso bozonus, to lauko agentus, kaip kažkokią terpę, didinančią erdvės „klampumą".

Teorija, kurią Edinburgo universiteto profesorius Peteris Higsas paskelbė 1964 metais, kuo toliau, tuo darosi parankesnė, kadangi dabar „išminčiai" teoretikai, užsiimantys „visa ko" teorija – superstygomis, supersimetrijomis ir supergravitacija, vis labiau ja remiasi. Kadangi prognozuojama Higso bozono masė turėtų būti ne mažesnė kaip keli šimtai GeV/c^2, šiuolaikinių greitintuvų jis dar negali būti sukurtas. Naujasis CERN'e kuriamas didysis hadronų kolaideris (*LHC – large hadron collider*) būtent ir bus skirtas pirmiausia tokiems eksperimentams atlikti.

Jei fizikai sužinotų, kas sukuria dalelių mases, jie galėtų rasti ryšį tarp kvantinės fizikos ir Einšteino gravitacijos teorijos. Tai būtų vienas didžiausių fizikos atradimų.



26.39 pav. **Įvykio, kurį prognozuoja Higso teorija, kompiuterinis modelis. (Joks greitintuvas dar negali suteikti dalelėms energijos, galinčios sukelti šį įvykį). Susidūrus protonui su protonu, atsiradęs Higso bozonas skyla į keturis miujonus (nulekiančius trajektorijomis, pažymėtomis raudonos spalvos tiesėmis) ir dar daugelį kitų dalelių**

SANTRAUKA

Išnagrinėję šio skyriaus medžiagą jūs turėjote sužinoti tokius dalykus:

- Trys dalelės – neutronas, protonas ir elektronas – yra pakankamos stabilių atomų savybėms paaiškinti.
- Visos keturios dalelių sąveikos sukeliamos skirtingų bozonų.
- Yra atrasta labai daug kitokių dalelių, susidarančių įvykus kosminių spindulių (didelės energijos protonų, elektronų ar atomų branduolių srauto, atskriejančio į Žemę iš kosmoso) arba greitintuvuose sukurtų dalelių susidūrimams.
- Dalelės ir jų antidalelės klasifikuojamos pagal jų rimties masę (barijonai, mezonai, leptonai), kitas savybes (krūvį, barijonų skaičių, keistumą ir panašiai) bei pagal jų reakciją į įvairias jėgas.
- Šios dalelių savybės aptiktos taikant reakcijoms įvairius tvermės dėsnius.
- Dalelių elgesys, jų sąveikos ir netgi jų prigimtis paprasčiausiai paaiškinama naudojantis kvarkų modeliu.
- Yra trys leptonų ir trys kvarkų kartos.
- Yra keletas tipų greitintuvų, veikiančių skirtingais fizikiniais principais. Dalelės greitintuvuose įgauna dideles energijas, kurios vėliau reakcijų metu panaudojamos kitoms dalelėms sukurti.
- Yra keletas skirtingų tipų dalelių detektorių, kurių veikimas pagrįstas įvairiais fizikiniais principais.
- Paprastas reakcijas ir skilimus teoriškai pagrindžia reliatyvumo teorija, skirta didelių energijų, masių ir greičių dalelėms nusakyti.
- Tvermės dėsniai įgalina suprasti dalelių sąveikas. Svarbiausi yra kvarkų modelis ir Feinmano schemos.

KLAUSIMAI

Duomenys
Elektrono krūvis $e = 1{,}6 \times 10^{-19}$ C
Elektrono rimties masė $= 9{,}1 \times 10^{-31}$ kg
Šviesos greitis $= 3{,}0 \times 10^{8}$ m · s^{-1}
Dalelių savybės pateiktos 26.15 lentelėje. (262 p.)

1 Paaiškinkite, kodėl elektronvoltas yra energijos vienetas.

2 Elektronas pagreitinamas lauke, kurio potencialų skirtumas yra $1{,}5 \times 10^{6}$ voltų. Išreikškite jo įgytą energiją **a)** džauliais, **b)** MeV.

3 Nustatykite neutrono rimties energiją, t. y. jo masės, lygios $1{,}675 \times 10^{-27}$ kg, energetinį ekvivalentą, ir išreikškite ją: **a)** džauliais, **b)** GeV.

4 Išreikškite elektrono rimties masę ($9{,}11 \times 10^{-31}$ kg): **a)** MeV/c^2, **b)** GeV/c^2.

5 **a)** Įvertinkite savo paties rimties energiją: **(i)** džauliais, **(ii)** GeV. **b)** Kokia jūsų rimties masė, išreikšta GeV/c^2 vienetais?

6 Didžiausia energija, kurią šiuolaikinis greitintuvas gali suteikti dalelei, yra apie 1800 GeV. Ar jos užtektų arbatinukui vandens užvirinti?

7 Išvardykite keturias fundamentaliąsias sąveikas. Eksperimentai, kuriais buvo siekiama aptikti gravitoną, kol kas nebuvo sėkmingi. Paaiškinkite, kodėl.

8 Kuriose šių reakcijų neišlaikytas krūvio tvermės dėsnis?
a) $\pi^- + p \rightarrow \Sigma^- + K^+$
b) $\pi^- + p \rightarrow n + \pi^+$
c) $n + \pi^+ \rightarrow \Lambda + K^0$
d) $\pi^- + p \rightarrow L^- + K^+$
e) $K^- + p \rightarrow \Omega^- + K^+ + K^-$

9 Koks pagrindinis skirtumas tarp: **a)** leptonų ir hadronų, **b)** mezonų ir barijonų?

10 Kiek **(i)** leptonų, **(ii)** barijonų yra: **a)** deguonies atome, **b)** deguonies branduolyje?

11 Kuriose šių reakcijų neišlaikytas barijonų skaičiaus tvermės dėsnis?
a) $\pi^- + p \rightarrow K^- + \pi^+$
b) $K^- + p \rightarrow \Sigma^- + \pi^+$
c) $\Sigma^- \rightarrow n + \pi^-$
d) $K^+ + (?)\, p \rightarrow K^+ + \pi^+$
e) $K^- + p \rightarrow n + \Sigma^+ + K^-$

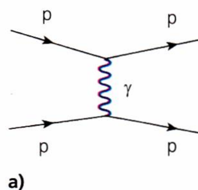
12 Visos šios reakcijos yra neįmanomos. Kokie tvermės dėsniai būtų sutrikdyti, jei jos vis dėlto įvyktų:
a) $p + p \not\rightarrow \mu^+ + e$
b) $\gamma + p \not\rightarrow n + \pi^0$
c) $p + p \not\rightarrow p + \pi^+$
d) $p + p \not\rightarrow p + \pi^+ + \pi^0 + \pi^-$

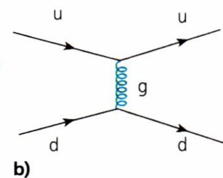
13 Kuriose iš šių reakcijų pažeistas keistumo tvermės dėsnis?
a) $\Lambda \rightarrow p + \pi^-$
b) $\pi^- + p \rightarrow \Lambda + K^0$
c) $p + \bar{p} \rightarrow \bar{\Lambda} + \Lambda$
d) $\Xi^- \rightarrow \Lambda + \pi^-$
e) $\pi^- + p \rightarrow \pi^- + \Sigma^+$
f) $\Xi^0 \rightarrow p + \pi$

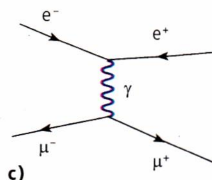
14 Koks pagrindinis skirtumas tarp stipriosios ir silpnosios sąveikų: **a)** reakcijos laiko, **b)** kvarkų skaičiaus ir tipo prieš ir po reakcijos, **c)** keistumo tvermės požiūriu?

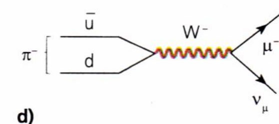
15 Visos šios reakcijos yra stebimos. Kurios jų vyksta sukeliamos stipriosios, o kurios – silpnosios sąveikos?
a) $\pi^+ + p \rightarrow \Sigma^+ + K^+$
b) $\Omega^- \rightarrow \Xi^+ + \pi^0$
c) $\Omega^- \rightarrow \Lambda + K^-$
d) $K^- + p \rightarrow n + K^0$

16 Paaiškinkite, kokį procesą vaizduoja šios Feinmano schemos ir parašykite atitinkamų reakcijų lygtis.









26.K16 pav.

17 Nubraižykite Feinmano schemas, iliustruojančias šias reakcijas. Kur įmanoma, nurodykite kvarkų sudėtį.

a) $e^+ + e^+ \rightarrow e^+ + e^+$
b) $\pi^+ + p \rightarrow \Sigma^+ + K^+$
c) $K^+ \rightarrow \pi^0 + \pi^+$
d) $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$

18 Kokie pagrindiniai ciklotronų ir sinchrotronų skirtumai? Paaiškinkite jų priežastis.

19 Kuo skiriasi barijonų, mezonų ir leptonų kvarkų sudėtis?

20 Pasinaudodami kvarkų modeliu paaiškinkite, kodėl **a)** antibarijonai turi neigiamą barijonų skaičių, **b)** mezonų barijonų skaičius lygus nuliui.

21 Stebimos tokios reakcijos, sukeliamos *stipriosios* sąveikos:

$\pi^- + p \rightarrow n + \pi^+ + \pi^- + \pi^0$
$K^- + p \rightarrow \Sigma^- + \pi^+$

a) Naudodamiesi 26.15 lentelėje pateiktais duomenimis, išvardykite visų dalelių, dalyvaujančių šiose reakcijose, kvarkų sudėtį.
b) Priskirkite kiekvienam kvarkui +1, kiekvienam antikvarkui –1 ir patikrinkite keistumo tvermės dėsnį šių reakcijų metu.
c) Remdamiesi taisykle, kurią patikrinote **b)** dalyje, paaiškinkite, kodėl negali vykti tokia reakcija:
$\pi^+ + p \rightarrow \Sigma^+ + K^+ + \Lambda$

22 Neutraliosios dalelės, tokios kaip neutronai arba lambda, nepalieka pėdsakų detektoriuose, tokiuose kaip burbuliukų kamera. Paaiškinkite: **a)** kodėl taip atsitinka, **b)** kaip vis tik iš burbuliukų kameros nuotraukų galima spręsti apie šių dalelių susidarymą reakcijų metu?

23 Yra tokios dalelės – rezonansai, kurių gyvavimo trukmė yra tik apie 10^{-23} s. **a)** Kokia sąveika gali sukelti šį skilimą? **b)** Kas tai per dalelės – ar jos priklauso hadronų, ar leptonų šeimoms?

24 Dvi dalelės, paminėtos pavyzdyje, pateiktame 271 p., judėdamos žinomais dideliais greičiais, įskrieja į magnetinį lauką. Kadangi laukas sudaro statų kampą su jų judėjimo kryptimis, jos pradeda judėti lankais. Raskite šių lankų spindulius, jei lauko stipris yra 1 mT (10^{-3} teslos).

25 Pabandykite paprastai įrodyti lygtį, kuri tiksliai susietų reliatyvistinių dalelių judesio kiekį, rimties masę ir pilnąją energiją:

$$E^2 = p^2c^2 + m_0^2c^4$$

a) Pilnoji energija masės m dalelės, judančios greičiu v, yra lygi $E = mc^2$. Tegul šios dalelės rimties masė yra m_0. Išreikškite E per m_0 ir Lorenco daugiklį, kuris priklauso nuo v ir c.
b) Perkelkite šaknį iš vardiklio į kairiąją lygties pusę ir pakelkite gauto reiškinio abi puses kvadratu.
c) Gautoje išraiškoje du kartus pasikartojo E^2, vieną kartą pats vienas, kitą kartą – kaip daugiklis sudėtingesnėje išraiškoje. Išreikškite šį pastarąjį jo ekvivalentu mc^2. Gavote paprastą lygtį, kurioje susieti m, m_0, v ir c. Jums beliko pasinaudoti sąryšiu, kad p lygus mv.

26 Dramblys, važiuojantis riedučiais, susiduria su stalo teniso kamuoliuku,skriejančiu 50 m/s greičiu.

a) Aprašykite susidūrimo sukeltą efektą **(i)** drambliui, **(ii)** stalo teniso kamuoliukui.
b) Įvertinkite, nesigilindami į detales, kamuoliuko (jo masė 5 g) ir dramblio (masė 10 tonų) judesio kiekių pokyčius.
c) Nurodykite, kaip pasikeičia kamuoliuko kinetinė energija: **(i)** labai pasikeičia, **(ii)** beveik nepakinta.
d) elektronas (jo masė yra $0{,}0005u$), skriejantis 10^5 m/s greičiu, susiduria su protonu (masė lygi $1u$) ir atšoka. Kaip pakinta jo kinetinė energija: **(i)** labai pakinta, **(ii)** beveik nesikeičia?
e) Kai didžiuliu greičiu (0,99 c) skriejantis elektronas susiduria su protonu, jis gali prarasti labai didelę kinetinės energijos dalį. Kodėl taip atsitinka?

27 Alfa dalelė (masės skaičius 4), judanti 2×10^6 m/s greičiu, Vilsono kameroje susiduria su deguonies branduoliu (masės skaičius 16), kuris prieš smūgį buvo parimęs. Tarkime, jos susiduria kaktomuša, taigi po smūgio abi nulekia išilgai tos pačios tiesės, kuria atskriejo elektronas.

a) Naudodamiesi vienetais, kurie yra uždavinio sąlygoje, išreikškite alfa dalelės judesio kiekį prieš susidūrimą.
b) Koks bendras abiejų dalelių judesio kiekis po susidūrimo?
c) Parašykite lygtį, siejančią dalelių judesio kiekius po susidūrimo. Joje turi būti du nežinomieji.
d) Pakartokite samprotavimus, pateiktus dalyse **a)**, **b)** ir **c)** dalelių kinetinėms energijoms prieš ir po susidūrimo. Gaukite šių energijų sąryšį; jame vėl turi būti tie patys du nežinomieji.
e) Išspręskite gautą lygčių sistemą dviems nežinomiesiems ir raskite greičius, kuriais alfa dalelė ir deguonies branduolys nulekia po susidūrimo.

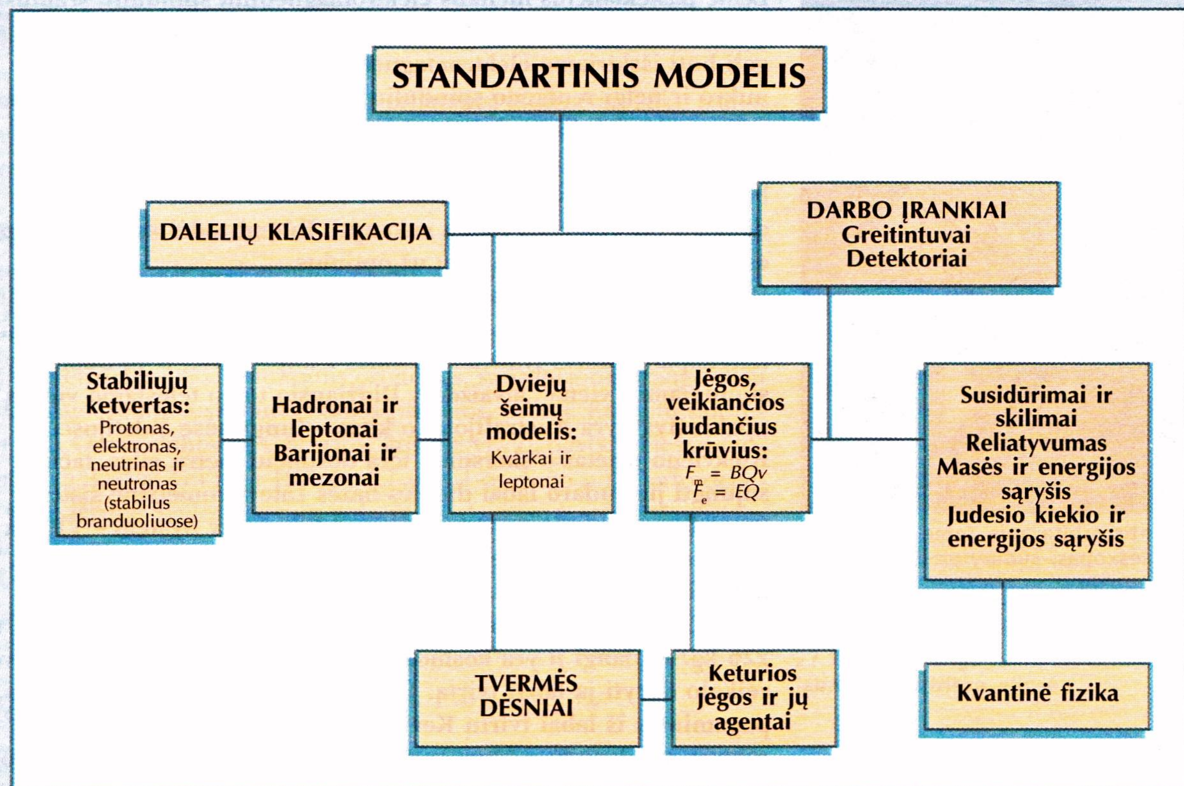
28 Susiduriančių pluoštelių eksperimente elektronas, kurio pilnoji energija lygi 4,7 GeV, susiduria su pozitronu, kurio pilnoji energija yra tokia pat. Tarkime, susidūrimo metu susidaro viena nauja dalelė.

a) Koks šios dalelės judesio kiekis?
b) Kokia jos rimties energija?
c) Kokia jos rimties masė?
d) Ar naujoji dalelė yra leptonas, ar ji yra barijonas?

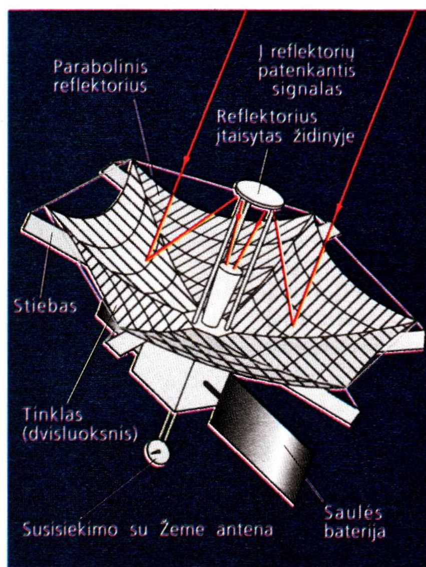
29 Raskite greitį, kuriuo juda **a)** elektronas, **b)** protonas, pagreitinti 500 V potencialų skirtumo lauke.

GILIAUSIEJI MATERIJOS KLODAI

Šioje schemoje pateikti pagrindiniai dalelių fizikos teiginiai, išdėstyti šiame skyriuje. Pateiktos taip pat žinios apie pagrindinius prietaisus, skirtus elementariosioms dalelėms tirti ir jas suprasti. Jūs galite pasitikrinti, kaip supratote pagrindinius teiginius ir kaip jie yra tarpusavyje susiję.



27 Astrofizika



Skriejantis orbita apie Žemę radioteleskopas, sudarytas iš Kevlaro kabelių tinklo

Visa, kas yra žinoma apie žvaigždes, gauta stebint ir tyrinėjant Žemę pasiekiančius menkus elektromagnetinių spindulių srautus, teikiančius informacijos. Spinduliams patekus į teleskopus, juose gali būti išskiriama elektromagnetinio spektro optinė, radijo, mikro ir netgi rentgeno spindulių sritys. Teleskopai daromi kiek galima didesni, kad sukauptų kuo didesnį energijos kiekį ir pateiktų daugiau gaunamų atvaizdų detalių. Beje, kuo didesnis bangų ilgis, tuo sunkiau užfiksuoti smulkias detales, taigi tuo daugiau informacijos reikia sukaupti. Būtent todėl radioteleskopai esti daug didesnių matmenų už optinius.

Radioteleskopus galima sujungti, kad jie bendrai kauptų to paties šaltinio spinduliuotę. Labai tiksliai laikrodžiais sinchronizuojami teleskopai, esantys įvairiuose Žemės kampeliuose, ir jų duomenys sujungiami į vieną „atvaizdą". Didžiausio tokio teleskopo vienas „pakraštys" yra Australijoje, o kitas – Jungtinėse Valstijose. Kiekvieno prietaiso skersmuo tėra dešimčių metrų eilės, tačiau sujungti jie sudaro labai didelės bazės Interferometrinę sistemą (angliškai – Very Long Baseline Interferometry System – VLBI). Dar didesnė VLBI paleista 1997 metais. Jos bazė yra du kartus ilgesnė už Žemės spindulį, kadangi dalis sistemos yra už Žemės ribų. Lėkštė, kurią sukonstravo japonų radioastronomai, sveria tik 226 kg. Kadangi ji yra kosmose, taigi besvorėje būsenoje, nebuvo reikalo daryti ją labai tvirtą. Ji plonytė, atrodo tarsi voratinklis, pagamintas iš labai tvirtų Kevlaro kabelių. Keliama į kosmosą raketos smaigalyje ji buvo suglausta tarsi lietsargis, ir tik orbitoje išsiskleidė, sudarydama 8,4 m skersmens lėkštę. Ji siunčia į Žemę stebėjimų duomenis 130 megabaitų per sekundę greičiu. Duomenis priima stotys Japonijoje, JAV, Ispanijoje ir Australijoje, o juos analizuoja dar kelios kitų valstybių laboratorijos.

Šiame skyriuje pirmiausia apžvelgsime pagrindines Saulės sistemos, t. y. pačios Saulės, jos planetų, asteroidų bei kometų savybes ir jų susidarymo modelius. Po to nuodugniau panagrinėsime pačią Saulę, kuri yra vienintelė žvaigždė, esanti arti Žemės ir todėl geriausiai ištyrinėta.

Mūsų žinios apie artimiausias Visatos sritis daugiausia remiasi informacija, kurią į Žemę atneša elektromagnetinės bangos. Nors yra ir nelabai tolimų žvaigždžių, kurios gerokai didesnės ir ryškesnės už Saulę, vis dėlto jos yra taip toli, kad mums matomos net pro galingus teleskopus vos smeigtuko galvutės dydžio. Vis tik informacija, kurią atneša šios elektromagnetinės bangos, yra nepaprastai gausi ir svarbi.

Naudodamiesi šia informacija astronomai išdėsto žvaigždes, priklausomai nuo jų dydžio, šviesio ir amžiaus, įvairiuose Hercšprungo ir Raselo diagramos taškuose. Beveik visos stebimos žvaigždės priklauso mūsų galaktikai, vadinamai Paukščių Taku. Stebima taip pat labai daug kitų galaktikų, bet jos yra dar neįsivaizduojamai toliau, todėl vėlgi atrodo kaip smeigtuko galvutės, nors kiekviena jų turi šimtus milijardų žvaigždžių. Smulkiau jas panagrinėsime 28-ajame skyriuje.



Dujų debesys Erelio ūke, nufotografuoti Hablo teleskopu

Žvaigždžių fizika daugiausia tyrinėja jų vidinės energijos šaltinius ir pusiausvyrą, nusistovinčią tarp energijos spinduliavimo ir jos kaupimo-

si žvaigždės viduje procesų, veikiant branduolinėms ir gravitacinėms jėgoms.

Galų gale įdomu yra ir tai, į ką pavirsta žvaigždė sudegus jos turėtam branduoliniam kurui, kai pusiausvirąja tampa tokia būsena, kad susidaro raudonosios milžinės, baltosios nykštukės, supernovos, neutroninės žvaigždės arba netgi juodosios skylės.

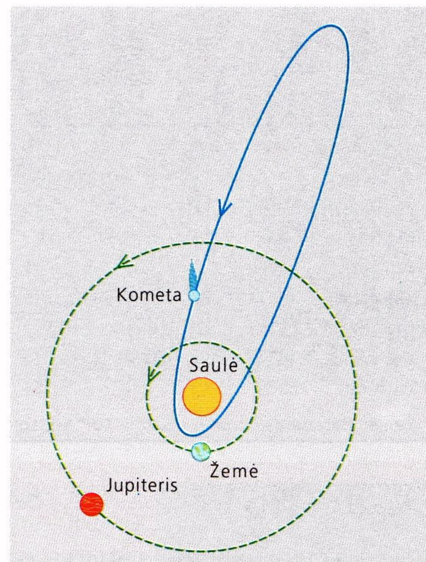
1 SAULĖS SISTEMA

Planetos juda apie Saulę eliptinėmis orbitomis, kuriose jas laiko Saulės gravitacinė jėga. Saulės sistemoje yra ir **asteroidų žiedas**, išsidėstęs tarp Marso ir Jupiterio orbitų.

Periodinės kometos

Sistemoje dar yra ir **periodinių kometų**, tokių kaip Halio kometa. Kometos yra daug mažesnės už planetas. Jos susidariusios iš dulkių, akmenų, vandens ledo ir įvairių dujų priemaišų (27.1 ir 27.2 pav.). Periodinės kometos juda labai ištęstomis orbitomis, siekiančiomis daug toliau už Plutono, tolimiausios nuo Saulės planetos, orbitą. Kometų šaltinis gali būti **Oorto debesys**, t. y. sritis, kurioje yra daugybė objektų (apskaičiuota, kad jų yra apie 10^{12}, žr. 4.1 pav. 1-os d. 56 p.). Oorto debesys yra pačiame Saulės sistemos pakraštyje, daugiau kaip tūkstantį kartų toliau nuo Saulės nei Plutonas.

Saulės sistemos masė sudaro apie $2{,}0 \times 10^{30}$ kg. Maždaug 99,9% šios masės yra sukoncentruota Saulėje. Didžiausios planetos, Jupiterio, masė yra tik $1{,}899 \times 10^{27}$ kg, t. y. sudaro mažiau nei 0,1% Saulės masės.



27.1 pav. Būdinga kometos orbita yra labai ekscentriška elipsė

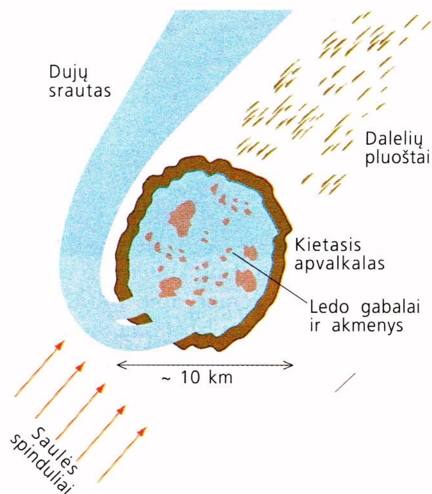
Skaičiai tikrai astronominiai

Jeigu astronominius atstumus išreikštume įprastiniais vienetais, tokiais kaip metrai ar kilometrai, gautume nepaprastai didelius skaičius, su kuriais būtų nepatogu atlikti veiksmus. Dėl to astronomai vartoja du kitokius vienetus – astronominį vienetą ir parseką. Populiariojoje astronomijoje dar vartojamas toks vienetas, kaip šviesmečiai.

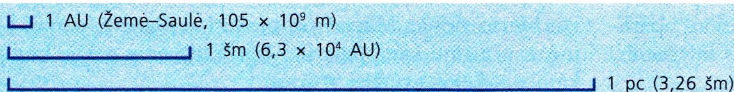
Astronominis vienetas av, AU (nuo angliško astronomical unit), yra lygus vidutiniam atstumui tarp Žemės ir Saulės, lygiam 150×10^9 m. Matuojant šiais vienetais, Jupiteris yra nutolęs nuo Saulės apie 5 AU, o Plutonas – apie 40 AU. AU yra labai dažnai astronomų vartojamas vienetas, kadangi juo pagrįstas atstumų *matavimas* paralakso metodu, aprašytu 1-os d. 12 puslapyje. Kitas vienetas – **parsekas**, ps, yra daug didesnis už AU. Jo pavadinimas yra santrumpa nuo žodžių „paralakso sekundė“. Tai atstumas, iš kurio Žemės orbitos didysis pusašis matomas 1'' (kampinės sekundės) kampu. Jis lygus $2{,}06 \times 10^5$ AU ($3{,}1 \times 10^{16}$ m).

Šviesmečiai šm (anglų k. ly – *light year*), yra lygūs atstumui, kurį per vienerius metus nuskrieja šviesa. Tai sudaro apie $9{,}5 \times 10^{15}$ m. 1 ps sudaro apie 3,3 šm.

Kad susidarytumėte įspūdį apie šiuos atstumus, paminėsime, kad *artimiausia* mums žvaigždė, Kentauro žvaigždyno Proksima, yra nutolusi 4×10^{16} m atstumu, t. y. 4,2 šm arba 1,3 ps.



27.2 pav. Kometos branduolio struktūra ir Saulės poveikis jai



27.3 pav. Astronominiai atstumų matavimo vienetai (mastelių laikytis neįmanoma)



A Senoje astronomijos knygoje parašyta, kad planetų orbitų spinduliams galioja tokia taisyklė: kiekviena sekanti planeta yra du kartus toliau nuo Saulės nei prieš ją esanti. Naudodamiesi 27.1 lentele patikrinkite šį teiginį.

Žr. 1–4 klausimus. ■

2 SAULĖS SISTEMOS SVARBIAUSIOS SAVYBĖS

27.1 lentelėje pateikti pagrindiniai Saulės sistemos planetų duomenys. Planetos susitelkusios į dvi grupes – **vidinių planetų** ir **išorinių planetų**. Planetų lyginamieji matmenys pateikti 27.4 pav. Daugiau informacijos apie kiekvieną jų rasite žemiau pateiktuose trumpuose kiekvienos planetos aprašymuose.

27.1 lentelė. **Planetų duomenys**

Planeta	Vidutinis atstumas nuo Saulės (10^9 m vienetais)	Vidutinis atstumas nuo Saulės AU vienetais (Žemei lygu 1)	Orbitinis periodas (Žemės metais)	Apsisukimo apie savo ašį periodas (valandomis)	Pusiaujo polinkis į orbitos plokštumą (laipsniais)	Vidutinė paviršiaus temperatūra (Celsijaus laipsniais)	Tankis (kg/m³)	Masė Žemės masės vienetais (Žemės lygi 1)	Gravitacinis laukas paviršiuje (N/kg)	Palydovų skaičius	Didžiausias palydovas	Didžiausiojo palydovo masė (kg)	Vidutinis palydovo tankis (kg/m³)
Merkurijus	58	0,4	0,24	1416	0	350	5400	0,056	3,7	0			
Venera	108	0,7	0,61	5832	117	460	5300	0,815	8,9	0			
Žemė	150	1,0	1	24	23	15	5500	19,8	9,8	1	Mėnulis	$7,2 \times 10^{22}$	3340
Marsas	228	1,5	2	25	25	–20	4000	0,11	3,8	2	Fobas	$9,6 \times 10^{15}$	2200
Jupiteris	778	5,2	12	10	3	–73	1300	317,9	24,9	16	Ganimedas	$1,5 \times 10^{23}$	2000
Saturnas	1427	9,5	29	10	27	–120	700	95,1	10,5	17	Titanas	$1,3 \times 10^{23}$	1800
Uranas	2870	19,1	84	11	98	–213	1600	14,56	8,8	15	Oberonas	$6,0 \times 10^{21}$	1600
Neptūnas	4497	30,0	165	16	30	–213	2300	17,24	11,2	8	Tritonas	$2,2 \times 10^{22}$	2000
Plutonas	5900	39,3	248	154	98	–220	2000	0,0018	0,6	1	Charonas	$2,2 \times 10^{21}$	2400

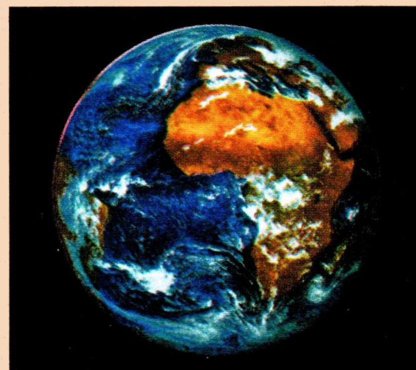
Žemės parametrai: masė = $5,97 \times 10^{24}$ kg; spindulys = $6,38 \times 10^6$ m

SAULĖS SISTEMOS PLANETOS

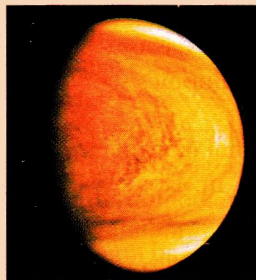
Šiuo metu Saulės sistemos planetos yra neblogai ištyrinėtos įvairiais kosminiais aparatais. Pateikiame trumpus jų aprašymus.



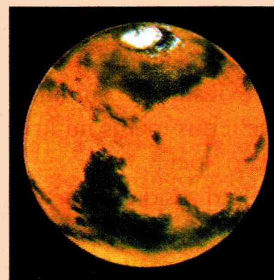
MERKURIJUS, arčiausiai prie Saulės esanti planeta, juda orbitoje labai greitai – jos metai tetrunka 88 Žemės paras. Ji yra veikiama labai stipraus Saulės gravitacinio lauko, sukeliančio dideles potvynių jėgas. Jos para (apsisukimo apie savo ašį periodas) prilygsta maždaug dviem trečdaliams jos metų. Merkurijaus paviršius panašus į Mėnulio paviršių. Jame matyti daug kraterių, o temperatūra kinta labai dideliame diapazone – nuo labai žemos, apie 100 K naktį, iki didžiulio karščio – apie 700 K, dieną. Jo atmosfera labai reta, sudaryta daugiausiai iš vandenilio.



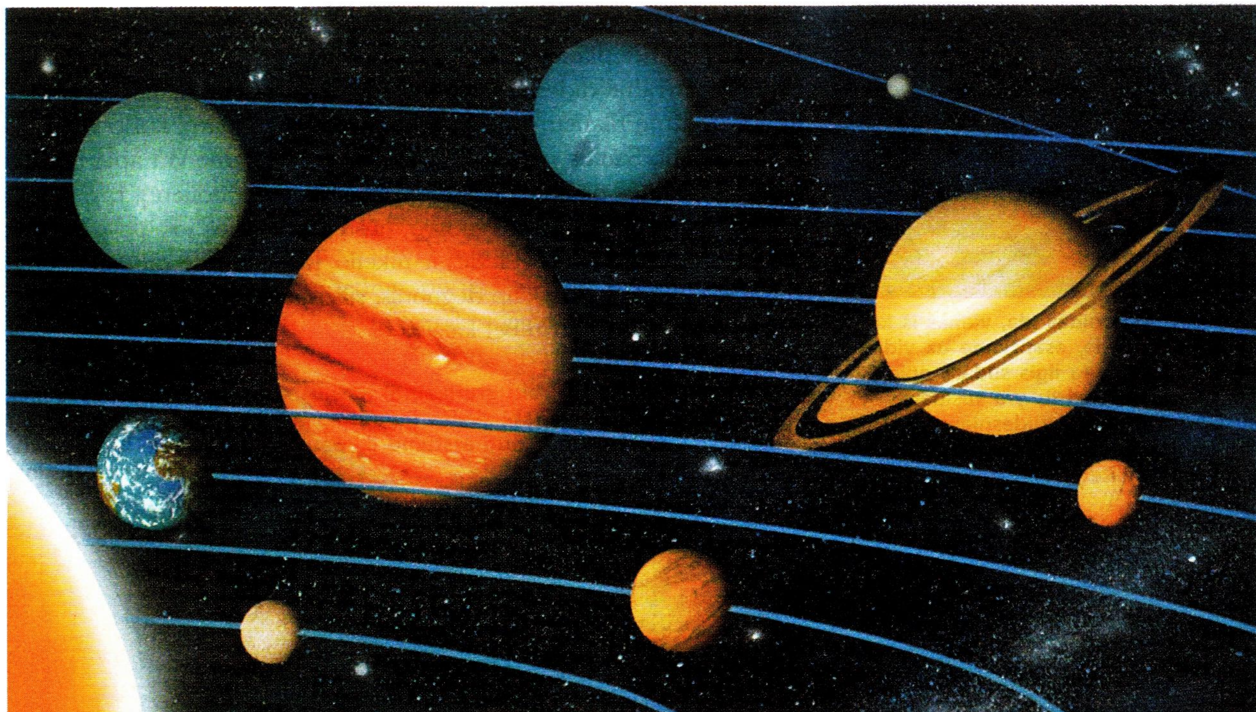
ŽEMĖ yra vienintelė apgyventa planeta, ji turi atmosferą ir pakankamai vandens savo paviršiuje. Ši įdomi planeta aprašyta 23 skyriuje.



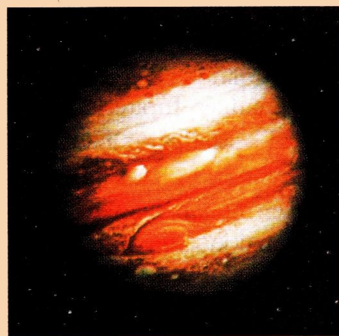
VENERA yra beveik tokio pat dydžio, kaip Žemė, ir ne ką už Žemę arčiau nuo Saulės. Ji būtų dar labiau panaši į Žemę, jei ne jos atmosfera. Ši sudaryta beveik vien tik iš anglies dioksido (98%), o šiltnamio efektas pakelia paviršiaus temperatūrą iki 700 K, kuri beveik nekinta dieną ir naktį. Tam pasitarnauja ir jos atmosferos slėgis, beveik 95 kartus didesnis už Žemės atmosferos slėgį. Jos debesys, susidarę iš koncentruotos sieros rūgšties, visiškai slepia paviršių; dabar tas paviršius yra neblogai ištyrinėtas radarais ir įvairiais nuleistais aparatais, kurie, nors ir negali ilgai gyvuoti tokiomis sąlygomis, suspėjo atsiųsti šiek tiek informacijos.



MARSAS yra daug mažesnis už Žemę, todėl jo gravitacinis laukas irgi daug silpnesnis. Taigi jis negali išlaikyti pakankamai tankios atmosferos. Jo paviršiuje stebimi ne tik susidūrimų krateriai, bet ir kažkokie kanalai, kuriais kadaise tikriausiai tekėjo vanduo. Šiek tiek vandens Marse galima aptikti ir dabar, jis sudaro poliarines ledo kepures. Gali būti, kad daugiau vandens yra Marso viduje. Marsas yra paskutinė planeta, panaši į Žemę, t. y. turinti kietą paviršių. Joje kada nors galėjo būti tinkamos sąlygos gyvybei atsirasti.



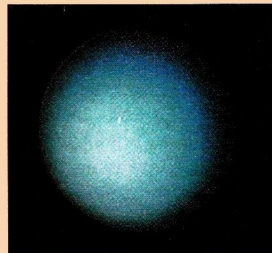
27.4 pav. **Saulės Sistemos planetos**



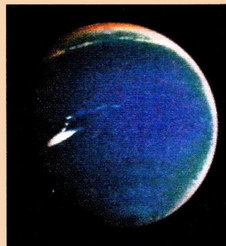
JUPITERIS yra didžiausia Saulės sistemos planeta, būdingiausia antrajai, Jupiterio tipo planetų grupei, kurios, priešingai žemiškosioms, sudarytos iš dujų. Labai panašu, kad jų paviršiuje yra skysto vandenilio. Deja, tas paviršius paslėptas labai aktyvioje atmosferoje, į kurią tarsi suvystyta ši planeta. Atmosferos išorėje nuolat matyti Raudonoji Dėmė – apie 40 000 km ilgio sūkurio židinys. Gali būti, kad Jupiterio centre yra sudaryta iš silikatų šerdis (apie 20 kartų didesnės nei Žemė masės), apsupta metalinio, o toliau – ir skystojo vandenilio. Jupiteris yra per mažas, kad būtų įsižiebęs kaip žvaigždė, kartu su Saule galėjusi sudaryti dvinarę sistemą.



SATURNAS yra planeta, kurios žiedų sistema matyti iš Žemės. Ji yra antroji Jupiterio grupės planeta, turinti labai panašias savybes. Jos tankis irgi labai mažas (net mažesnis už vandens tankį). Saturno žiedai labai ploni – tik keleto kilometrų storio, bet išplitę iki 140 000 km virš planetos paviršiaus. Jie sudaryti iš mažų ledo gabaliukų arba dulkių dalelių, padengtų ledu. Vojadžerio zondas yra ištyrinėjęs tuos Saturno žiedus, taip pat atradęs naujų ne tik Saturno, bet ir kitų šio tipo planetų – Jupiterio, Urano ir Neptūno, žiedų.



URANAS Pirmą kartą aptiktas 1781 m. V. Heršelio (*William Herschel*), gaminusio ir tobulinusio teleskopus. Tikriausiai sudarytas iš Žemės dydžio kietos šerdies, apsuptos ledo ir uolienų sluoksnio bei tankios atmosferos, sudarytos iš vandenilio, helio, šiek tiek vandens, amoniako ir metano. Jo sukimosi ašis yra orientuota kiek neįprastai – ji nukreipta beveik išilgai tiesės, jungiančios Uraną su Saule.



NEPTŪNAS buvo pirmoji teoriškai atrasta planeta, 1846 m. pritaikius Niutono dėsnius Urano orbitos netolygumams paaiškinti. Apie Neptūną žinoma nelabai daug. Jo atmosfera irgi sudaryta iš vandenilio ir helio. Joje vėlgi stebimas kažkoks sūkurys, vadinamas Didžiąja Tamsiąja Dėme (nuotraukoje matyti kaip balta dėmė). Neptūnas spinduliuoja tris kartus daugiau energijos, nei gauna iš Saulės; tai reiškia, jis turi daug vidinės šiluminės energijos, galbūt karštą šerdį.



PLUTONAS buvo atrastas tik 1930 m., o jo dvynys ir palydovas Charonas – tik 1978 m. Abi jos susidariusios iš uolienų, padengtų sušalusiu metanu. Jo orbita yra ekscentriška, panaši į ištęstą elipsę, todėl kartais jis būna arčiau Saulės negu Neptūnas.

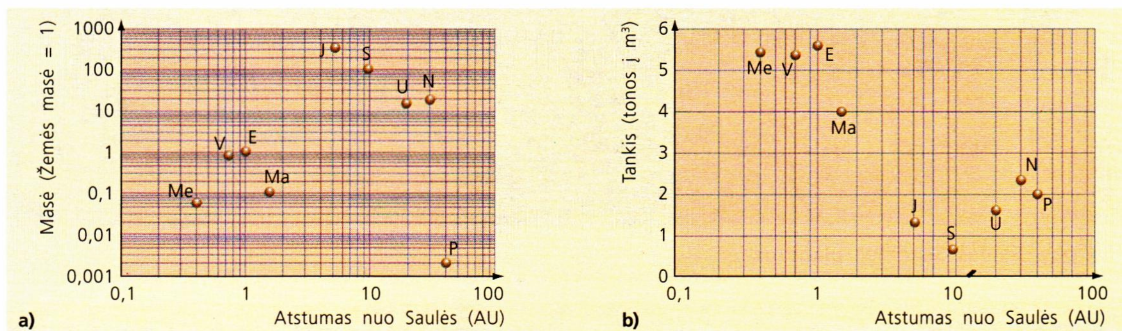


27.4 pav. **Asteroidas Ida, vienas iš kūnų, skriejančių žiede, esančiame už vidinių planetų orbitų. Jo ilgis sudaro apie 52 km. Manoma, kad jis yra susidaręs suskilus kažkokiam didesniam objektui. Šią nuotrauką padarė Galilėjaus zondas pakeliui į Jupiterį**

Vidinės planetos

Keturios vidinės planetos yra Merkurijus, Venera, Žemė ir Marsas, kurių orbitos yra ne didesniu kaip 1,5 AU atstumu nuo Saulės. Toliau už jų yra „mažųjų planetų" ir asteroidų žiedas (27.4 pav.), kurio vidutinis atstumas nuo Saulės yra 2,8 AU. Spėjama, kad jame yra apie 50 000 objektų. Vidinės planetos ir asteroidai sudaryti iš uolienų, t. y. iš medžiagų, panašių į tas, kurios sudaro mūsų Žemę – tiek jos paviršių, tiek ir vidų. Jų šerdys yra iš geležies ir nikelio, taip pat jose randama lengvesnių elementų, tokių kaip deguonis, silicis, aliuminis, manganas, šiek tiek mažiau kalio, natrio bei kalcio.

27.5 pav. **Planetų savybių grafikai:** a) **masių pasiskirstymas priklausomai nuo atstumo iki Saulės (abi skalės logaritminės).** b) **tankio pasiskirstymas priklausomai nuo atstumo iki Saulės (viena skalė logaritminė, kita – tiesinė)**



?

B Pabandykite rasti dėsningumus 27.1 lentelėje. Remdamiesi tais duomenimis ištirkite, kaip priklausomai nuo atstumo iki Saulės kinta planetų temperatūra, sukimosi orbita periodas bei apsisukimo apie savo ašį periodas. Pakomentuokite aptiktus dėsningumus.

C Nurodykite: **a)** dvi pagrindines chemines ir **b)** dvi pagrindines fizikines Saulės Sistemos planetų savybes.

Žr. 5 klausimą. ■

Išorinės planetos

Išorinės planetos yra keturios, sudarančios vadinamąją Jupiterio grupę (Jupiteris, Saturnas, Uranas ir Neptūnas) ir labai keista, „dviguba planeta" Plutonas – Charonas. Visos jos yra daug toliau nuo Saulės nei Žemės grupės planetos. Jupiteriškųjų planetų ir skersmuo, ir masė daug didesni. Taip pat jos yra daug mažesnio tankio, taigi jų sandara yra visiškai kitokia. Daugiausia jas sudaro lengvieji elementai vandenilis ir helis – planetų paviršiuje jie dujų pavidalo, o viduje virtę skysčiais ir netgi sukietėję.

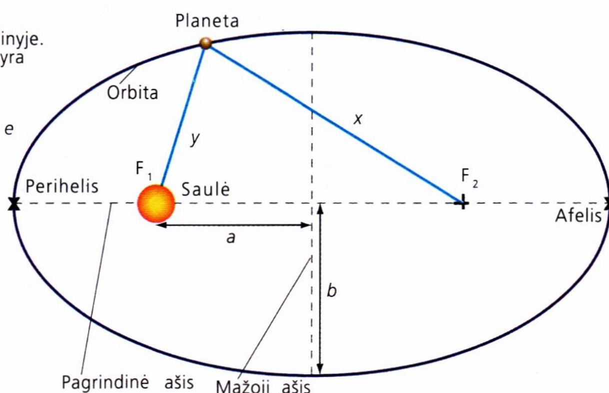
Plutonas atrastas tik 1930 m.; jis yra labai mažas ir tikriausiai panašios sudėties į žemiškąsias planetas.

Planetų judėjimas

Visos planetos juda orbitomis apie Saulę ta pačia kryptimi, kuri, žiūrint iš Žemės šiaurės poliaus, yra nukreipta prieš laikrodžio rodyklę. Visų planetų orbitų plokštumos beveik sutampa.

F1 ir F2 yra elipsės židiniai. Saulė yra židinyje. (x+y) planetai judant yra pastovus.

$\frac{a}{b}$ = ekscentricitetas *e*



Ekscentricitetas *e*
Apskritimo – 0
Merkurijaus – 0,206
Veneros – 0,007
Žemės – 0,017
Jupiterio – 0,048
Plutono – 0,253

27.6 pav. **Planetų orbitos yra elipsės**

Planetų orbitos yra elipsės, vadinasi, kartais jos būna arčiau, o kartais – toliau nuo Saulės. Lentelėse paprastai pateikiamas vidutinis planetos atstumas nuo Saulės. Daugelio planetų jis yra labai artimas tikrajam jos atstumui nuo Saulės bet kuriuo momentu, tačiau Merkurijus ir Plutonas turi labiau ištęstas orbitas. Plutono orbita yra tokia ekscentriška, kad kartais jis atsiduria arčiau Saulės negu Neptūnas.

Saulė yra bet kurios planetos elipsės **židinyje** (27.6 pav.). Tikslūs planetų trajektorijų skaičiavimai yra labai sudėtingi, nes judėjimas elipse matematiškai yra daug sudėtingesnis už judėjimą apskritimu; be to, reikia atsižvelgti ir į pačių planetų sąveikos jėgas. Taigi aprašyti planetų judėjimą būtų labai sudėtinga, tačiau padarius prielaidą, kad dauguma planetų juda beveik apskritimais, skaičiavimai daug paprastesni, o gauti rezultatai, pasirodo, mažai skiriasi nuo tiksliai apskaičiuotų.

Planetų judėjimo dėsniai

Gravitacijos jėga, kuria Saulė veikia planetą, sukelia įcentrinį pagreitį, lygų v^2/r, jeigu planetos sukimosi orbita greitis lygus v, o jos atstumas nuo Saulės r. Niutono gravitacijos dėsnis (1-os d. 47 p.) nusako tos jėgos dydį:

$$GMm/r^2,$$

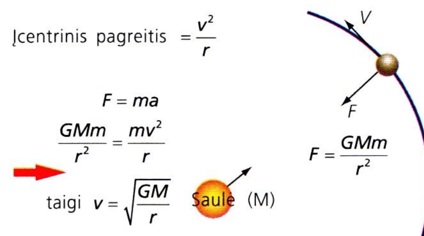
kur G yra universalioji gravitacinė konstanta, M – Saulės, o m – planetos masės. Remdamiesi antruoju Niutono dėsniu, teigiančiu, kad jėga lygi pagreičio ir masės sandaugai, gauname:

$$G\frac{Mm}{r^2} = m\frac{v^2}{r}$$

Šią lygtį galima supaprastinti: $$v = \sqrt{\frac{GM}{r}} \qquad [1]$$

taigi planetos sukimosi orbita greitis nepriklauso nuo jos masės, o priklauso tik nuo atstumo iki Saulės.

Tai labai naudinga išvada. Pavyzdžiui, ja remiantis galima rasti Saulės masę, jei tik žinomas kokios nors planetos orbitinis greitis. Vienintelis keblumas šiuo atveju yra gravitacinės konstantos G reikšmė, kuri Niutono laikais buvo iš viso nežinoma, o ir dabar yra viena iš sunkiausiai išmatuojamų fizikinių konstantų (žr. 1-os d. 47 p.).



27.7 pav. **Greitis orbitoje**

?

D Žemės orbita yra artima apskritimui, kurio spindulys lygus $1{,}5 \times 10^{11}$ m. Planeta nuskrieja šį atstumą per metus ($3{,}16 \times 10^7$ s).

a) Įrodykite, kad jos greitis orbitoje yra apie 3×10^4 m/s.

b) G yra lygus $6{,}7 \times 10^{-11}$ N · m^2 · kg^{-2}. Apskaičiuokite Saulės masę.

Keplerio nustatyti planetų judėjimo dėsningumai ir Niutono paaiškinimai

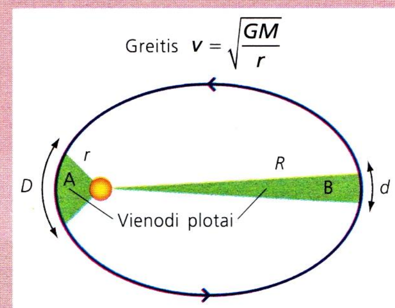
Niutonas suformulavo garsiuosius judėjimo dėsnius, kad galėtų paaiškinti planetų judėjimą. Remdamasis šiais dėsniais ir gravitacijos jėga jis mėgino paaiškinti planetų judėjimo dėsningumus, aptiktus J. Keplerio (*Johannes Kepler*, Austrija/Bohemija 1571–1630), ilgai stebėjusio planetų, ypač Marso, judėjimą. Svarbiausiais laikomi šie trys Keplerio dėsniai:

1 Elipsių dėsnis. Kiekvienos planetos orbita yra elipsė, kurios židinyje yra Saulė.

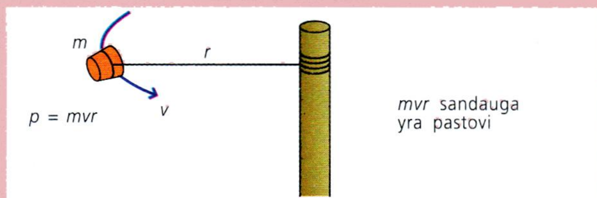
2 Vienodų plotų dėsnis. Atkarpa, jungianti planetą su Saule, per vienodus laiko tarpus nubrėžia vienodus plotus, kaip parodyta 27.8a) pav.

3 Harmonijos dėsnis. Bet kurios planetos apsisukimo apie Saulę periodo kvadratas yra tiesiog proporcingas jos vidutiniam atstumui nuo Saulės trečiuoju laipsniu. Tai užrašoma šitaip:

$$\frac{T^2}{R^3} = \text{const}$$



27.8a) pav. **Antrasis Keplerio dėsnis teigia, kad planetos, judėdamos orbitomis, nuskrieja atstumus *D* ir *d* per tą patį laiką. Arčiau prie Saulės jos juda greičiau, taigi *D* > *d*. Kepleris taip pat nustatė, kad plotai, kuriuos per vienodus laikus nubrėžia atkarpos, jungiančios planetą su Saule, yra vienodi, t. y. *A* = *B***



27.8b) pav. **Judesio kiekio momento tvermė. Jeigu kokį daiktą (čia – guminį kamštį) pririštą virvute prie stiebo sukate, tai virvutei užsivyniojant ir trumpėjant jo greitis vis didėja, nes turi būti išlaikytas judesio kiekio tvermės dėsnis**

Niutonas pateikė Keplerio dėsnių paaiškinimus ir juos įrodė remdamasis savo atrastais judėjimo dėsniais ir gravitacijos jėgos, kuri atvirkščiai proporcinga atstumo kvadratui, išraiška.

Pirmasis Keplerio dėsnis

Spręsdamas judėjimo lygtis Niutonas sugebėjo įrodyti, kad jei kūną veikia jėga, nukreipta išilgai tiesės, jungiančios jį su tam tikru tašku, jo trajektorija gali būti tik arba apskritimas, arba elipsė, arba hiperbolė. Hiperbolė, priešingai nuo pirmųjų dviejų, yra kreivė su atvirais galais; jei kometa juda išilgai hiperbolės, ji niekada negrįžta.

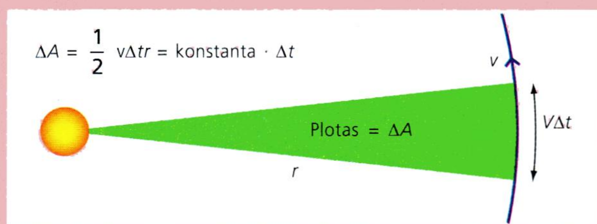
Antrasis Keplerio dėsnis

[1] lygtis kiekybiškai nusako antrąjį Keplerio dėsnį. Mažėjant r (kaip 27.8a) pav.) planeta juda greičiau (v didėja). Per tam tikrą laiką tiesė, jungianti planetą su Saule, judėdama apibrėš plotą A. Nutolusi nuo Saulės planeta juda lėčiau, todėl ši tiesė dabar judėdama apibrėš plotą B. Abu apibrėžtieji plotai A ir B lygūs, jei r padidėjimą kompensuoja sumažėjęs v.

Paprasčiausia šį Keplerio dėsnį matematiškai pagrįsti tuo, kad planetai judant orbita turi būti patenkintas judesio kiekio momento tvermės dėsnis:

judesio kiekio momentas $p = mvr = \text{const}$

Dabar pažvelkite į 27.9 pav.

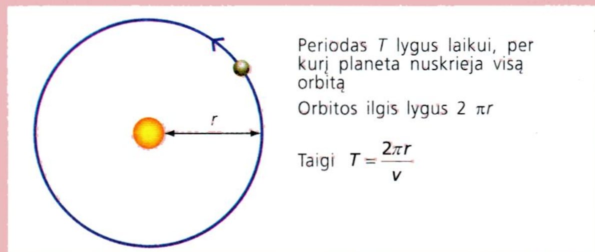


27.9 pav. **Schema, iliustruojanti antrojo Keplerio dėsnio įrodymą**

Per labai trumpą laiką Δt planetos orbitos spindulio linija, kurios ilgis r, apibrėžia mažą plotelį ΔA, kuris apytiksliai lygus trikampio, kurio pagrindas lygus $v\Delta t$, o aukštis r, plotui. Taigi

$$\Delta A = \frac{1}{2} v\Delta t r = vr \times \frac{1}{2}\Delta t$$

Kadangi planetos masė m jai judant nekinta, iš judesio kiekio momento lygties išplaukia, kad sandauga vr turi būti pastovi bet kokiame orbitos taške. Taigi plotelis, atitinkantis tą patį laiko intervalą, yra vienodas, nepriklausomai nuo atstumo r.



27.10 pav. **Orbitos periodo radimas pagal jos spindulį ir judėjimo greitį**

Trečiasis Keplerio dėsnis

Panagrinėkime planetą, judančią greičiu v išilgai apskritimo, kurio spindulys r. Jos orbitinis periodas yra laikas, per kurį ji apsisuka vieną kartą, t. y. nuskrieja atstumą $2\pi r$. Todėl:

$$T = \text{atstumas/greitis} = 2\pi r/v$$

Pagal harmonijos dėsnį: $v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$

Įrašę tai į periodo išraišką gauname: $T = 2\pi r \times \sqrt{\frac{r}{GM}}$

Pakėlus abi puses kvadratu: $T^2 = 4\pi^2 r^2 \times \frac{r}{GM}$

Suprastinę gauname: $T^2 = \frac{4\pi^2}{GM} \times r^3$

Taigi periodas kvadratu yra proporcingas vidutiniam atstumui nuo Saulės iki planetos trečiuoju laipsniu. Būtent tokiu pavidalu ir pateikiamas trečiasis Keplerio dėsnis:

$$\frac{T^2}{r^3} = \frac{4\pi^2}{GM} = \text{const}$$

Jis galioja ne tik planetoms, bet ir visiems kitiems kūnams, judantiems orbitomis gravitaciniuose laukuose. Dėsnis labai naudingas, kai reikia išmatuoti žvaigždžių mases (žr. 303 p.).

Žr. 6 klausimą. ■

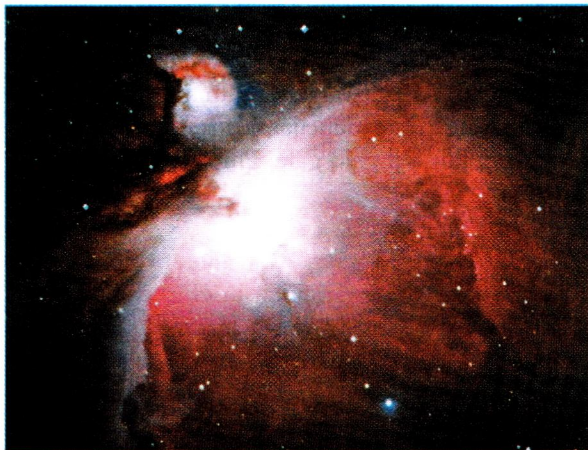


E Naudodamiesi 27.1 lentelėje pateiktais rezultatais patikrinkite, ar trečiasis Keplerio dėsnis galioja bent jau Venerai ir Marsui.

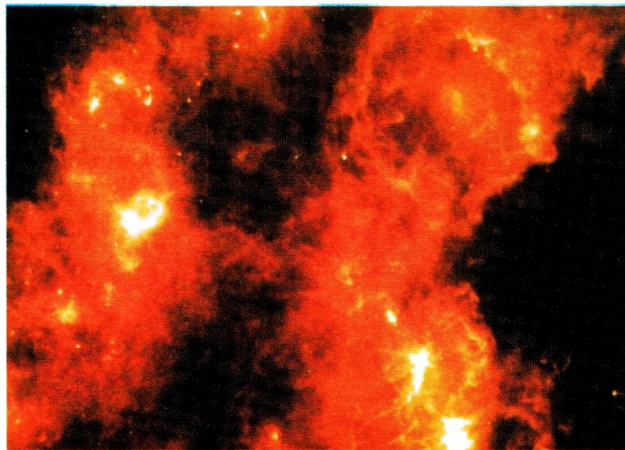
3 SAULĖS SISTEMOS SUSIDARYMAS IR RAIDA

Juodoji materija

Paukščių Take yra labai daug **„tamsiosios medžiagos"**, kuri neretai aptinkama pagal jos sugeriamą šviesą. Taip pat ji gali būti apšviesta netoli tos srities esančių žvaigždžių, panašiai kaip 27.11a) pav. Čia parodyta tamsiosios medžiagos sritis Oriono žvaigždyne, vadinamasis **ūkas**, sudarytas iš dujų ir dulkių ir apšviestas esančių už jo žvaigždžių. Dujų sudėtį galima ištirti pagal regimojo, taip pat pagal radijo spinduliavimo spektrus. Nustatyta, kad daugiausiai jame yra vandenilio. Iš to, kaip dulkės sąveikauja su šviesa, sprendžiama, kad jos yra nedidelės kruopelės, kurių paviršiuje yra „sausojo ledo", kaip 27.12 pav. parodytame piešinyje.



27.11a) pav. **Oriono ūko, nutolusio 1500 šm atstumu nuo Žemės, nuotrauka regimajame spektre. Šviesi centrinė sritis, sudaryta iš vandenilio dujų, slepia labai karštų žvaigždžių grupę, vadinamą Trapecija, kuri savo ultravioletiniu spinduliavimu jonizuoja vandenilį. Atkreipkite dėmesį į šviesias melsvas žvaigždes debesies centre ir žemiau jo dešinėje pusėje. Jų spalva rodo, kad šios žvaigždės susidariusios visai neseniai, kaip ir dauguma kitų šio ūko žvaigždžių**



27.11b) pav. **Oriono ir Vienaragio žvaigždynų nuotraukos infraraudonųjų spindulių diapazone. Jose matyti sritys, intensyviai spinduliuojančios infraraudonuosius spindulius. Viena jų yra Oriono ūkas, matomas 27.11a) pav. Čia ta sritis matoma kaip pats žemiausias šviesus lopinėlis dešinėje**

Matyt, būtent iš šių debesų susidaro ir žvaigždės, ir jų planetos, ne tik Saulės sistema.

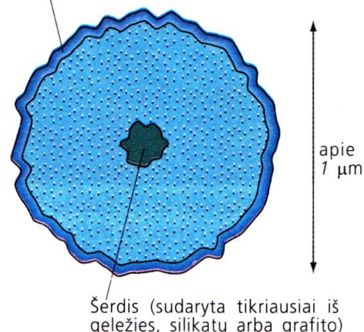
Žvaigždžių susidarymas

Kad susidarytų žvaigždė, tokia kaip Saulė, reikalingas ne mažesnio kaip keleto šviesmečių skersmens dujų ir dulkių debesis. Susidarant žvaigždei, didelė dalis pradinės „žaliavos" yra negrįžtamai prarandama, todėl jos turi būti kur kas daugiau nei yra sukaupta žvaigždėje. Be to, debesis turi išlikti stabilus milijardus metų. Tik tokiu atveju gravitacijos jėgos, kurios stengiasi išlaikyti jį nedideliame tūryje, pajėgia įveikti pasipriešinimą, atsirandantį dėl atsitiktinio šiluminio dalelių judėjimo. Jei ši sąlyga įvykdoma, tai prasideda **gravitacinis kolapsas**. Jis gali būti sukeltas ir kokio nors trikdžio, sukuriančio debesyje sritį, kurios tankis yra šiek tiek didesnis nei likusiose dalyse.

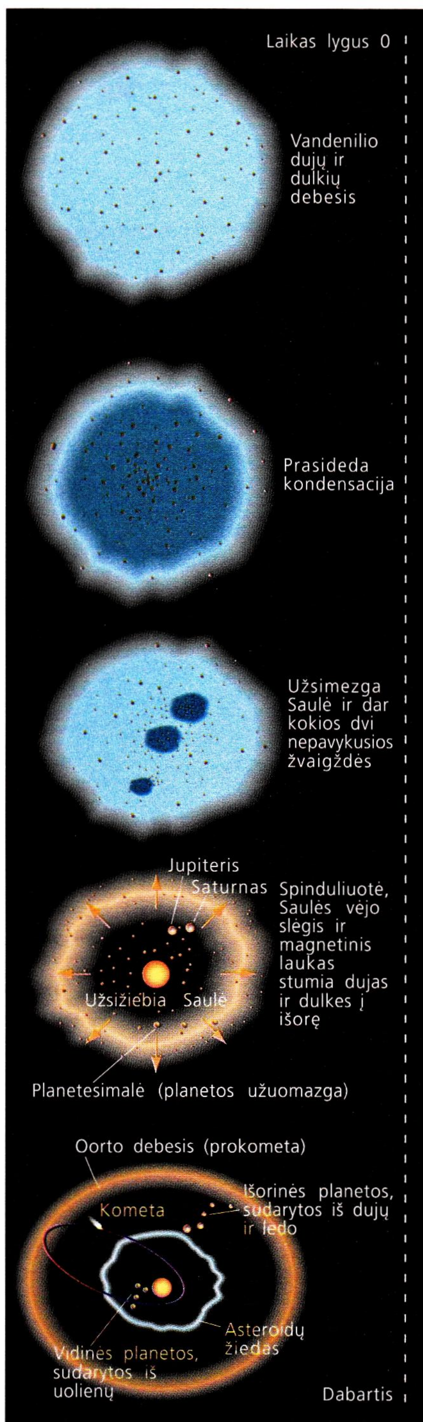
?

F a) Paaiškinkite, kodėl karštieji dujų debesys ne taip greitai susitraukia kaip šaltieji.

b) Kaip „atsitiktinis trikdis" gali paskatinti traukti karštą debesį, kuriam nebūdinga savaime tai padaryti?



27.12 pav. **Tarpžvaigždinių dulkių kruopelė. Jos branduolys sudarytas iš medžiagų, panašių į tas, kurios randamos meteorituose. Kometų branduoliai savo sandara panašūs į šią kruopelę gaubiantį apvalkalą, nes ji irgi sudaryta iš „sausojo ledo"; kaip tik išsiskiriančios iš branduolių dujos sudaro kometų uodegas**



27.13 pav. **Standartinis Saulės sistemos susidarymo iš dujų ir dulkių debesies modelis**

?

G Paaiškinkite, kodėl branduolinės sintezės reakcijos prasideda tik pasiekus aukštą temperatūrą.

Pirmoji fazė: debesies gravitacinis susitraukimas

Debesiui pradėjus trauktis dėl gravitacijos, dujos ir dulkės ima judėti link debesies masių centro, prarasdamos potencinę, bet įgaudamos vis didesnę kinetinę energiją. Aišku, judėdamos jos susidūrinėja, dujos kaista. Didelė įgytos energijos dalis išlieka tame debesyje, tačiau šiek tiek jos nusineša ir atsirandanti infraraudonoji spinduliuotė. Būtent ji ir gali būti pastebėta iš Žemės, tuo pačiu byloti apie to debesies egzistavimą ir jame vykstančius procesus.

Žinoma, besitraukiančio debesies centrinė dalis įkaista daug stipriau, bet vėsesnieji išoriniai sluoksniai jos spinduliuotę sugeria, ilgainiui perspinduliuodami ir paversdami ją infraraudonaisiais spinduliais, nes šie mažiau sugeriami toje aplinkoje ir išneša informaciją į aplinką. Tokio tipo spinduliuotė ir matoma kaip šviesios dėmės 27.11b) pav.

Antroji fazė: prožvaigždės gimimas

Nuo kolapso pradžios momento iki **prožvaigždės** gimimo praeina milijonai metų. Vykstant protožvaigždės evoliucijai, jos šerdis išlieka keletą kartų didesnė už žvaigždę, kuria ji galų gale tampa, todėl iš šerdies su didele vidine energija nuolatos skrieja visokios dalelės į išorę, t. y. į ją supantį apvalkalą, sudarytą iš debesies likučių.

Karšta šerdis tampa regima kaip **pagrindinės sekos protožvaigždė** (žr. 306 p.). Ši vis dar kaupia energiją ir traukiasi dėl gravitacijos, tačiau dujos joje jau būna praradusios elektronus ir tapusios plazma, sudaryta daugiausiai iš vandenilio atomo branduolių – protonų.

Trečioji fazė: pagaliau susidaro tikra žvaigždė

Maždaug dar po kokių 50 milijonų metų, kai labai didelio tankio šerdies temperatūra pasiekia apie 10 milijonų laipsnių, joje prasideda dar vienas procesas, tampantis pagrindiniu žvaigždės energijos šaltiniu – **branduolinė sintezė**. Tai yra vadinamasis „vandenilio degimas“, kai vykstant **protono–protono ciklui** protonai pradeda jungtis ilgainiui sudarydami helio atomo branduolius. Šis ciklas pavaizduotas 27.45 pav., (310 p.). Prasidėjus šioms reakcijoms, kai žvaigždė tampa branduolinės sintezės reaktoriumi, joje susidaro milžiniškas energijos kiekis (292 p.). Tada temperatūra labiau pakyla, ir reakcijos pradeda plėstis į vis didesnį tūrį.

Žvaigždėje nusistovi pusiausvyra

Debesys nustoja trauktis, nes išaugusi dalelių kinetinė energija pajėgia pasipriešinti gravitacijos skatinamam gniuždymui. Palyginkite tai su procesais Žemės atmosferoje: oro molekulių kinetinė energija verčia jas greitai judėti ir taip pasipriešinti traukai, t. y. nenukristi ant Žemės paviršiaus.

4 PLANETŲ SUSIDARYMAS IR SUKIMOSI NEIŠVENGIAMUMAS

Vykstant šerdyje šiems dramatiškiems pokyčiams, pats dujų debesis irgi keičiasi.

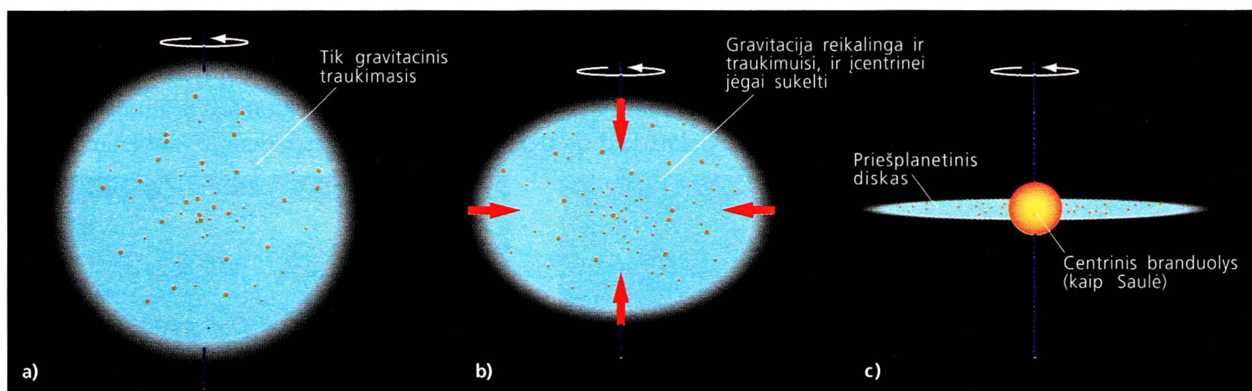
Disko susidarymas

Visi Paukščių Tako ir kitose galaktikose esantys objektai nuolat sukasi apie galaktikos centrą. Tas pats vyksta ir dujų bei dulkių ūke, tokiame kaip parodytas 27.11a) pav. Palaipsniui debesis transformuojasi į objek-

tą, kuris sukasi apie savo ašį. Jo išorinės sritys pradeda judėti greičiau nei vidinės, taigi visas debesis įgauna tam tikrą *judesio kiekio momentą* (žr. 1-os d. 174 p.).

Panagrinėkime, kas atsitinka su atomais, molekulėmis ir dulkėmis, esančiomis ūko pakraščiuose. Iš pradžių jie juda apie ūko centrą labai mažais greičiais v, ir kiekvieno jų judesio kiekio momentas lygus mvr. Pradėjus trauktis ūkui, jo judesio kiekio momentas turi išlikti, taigi sandauga (mvr) turi būti pastovi. Kadangi ūko masė nekinta, o jo vidutinis spindulys r traukiantis ūkui mažėja, judėjimo greitis v turi išaugti. Taigi besitraukiantis debesis sukasi vis greičiau ir greičiau.

Dalis gravitacijos jėgos, sutraukiančios dujas ir dulkes į debesies centrą, turi palaikyti besisukančių masių įcentrinę jėgą. Taigi traukimui lieka mažiau jėgos, ir susitraukimo greitis debesiui sukantis šiek tiek sumažėja. Tačiau tai galioja tik kryptimi, statmena sukimosi ašiai. Kryptimi išilgai sukimosi ašies įcentrinių jėgų nėra, todėl traukimosi jėga išlieka nepakitusi, ir jai veikiant debesys palaipsniui plokštėja į priešplanetinį diską, kaip parodyta 27.14 pav. Tame diske judantys atomai ir molekulės dėl veikiančių jėgų **kondensuojasi** ir sukimba į stambesnius darinius.



27.14 pav. **Kaip sferinis besisukantis debesis traukdamasis tampa plokščiu disku**

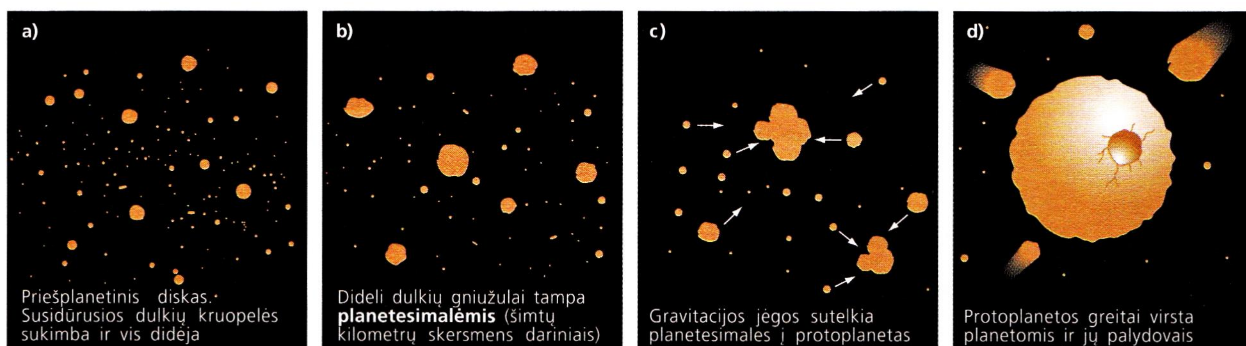
Tada vėl nusistovi pusiausvyra: dulkių ir dujų dalelių sukimosi greičiai esti pakankamai dideli, kad jos išsilaikytų stacionariose orbitose. Dėl gravitacijos susidaro pakankamos įcentrinės jėgos šerdies, t. y. naujosios žvaigždės užuomazgos, srityje.

Planetų susidarymas

■ Žr. 7, 8, 9 klausimus.

Dulkės juda toli gražu ne kokiomis nors tvarkingomis orbitomis. Jos nuolatos susidūrinėja, keičia judėjimo kryptį, o judėdamos dideliu greičiu ir susidūrusios sukimba ir sudaro didesnių masių gniužulus. Šis procesas vadinamas **akrecija**. Gniužulams didėjant, jų jungimosi procesai dar labiau paspartėja, ir tam tikro dydžio gniužulai gumulai tampa **planetesimalėmis**, t. y. dariniais, galinčiais pritraukti mažesnes daleles ir dar labiau plėstis.

27.15 pav. **Planetesimalių teorija**



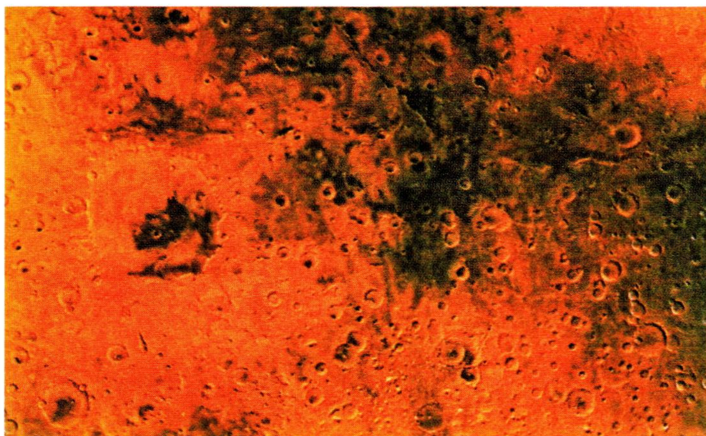
Ilgainiui planetesimalės, toliau evoliucionuodamos, virsta **planetomis** arba jų palydovais. Šis procesas parodytas 27.15 pav.

Susidarant naujoms planetoms, medžiaga labai įkaista, nes kūnams susidūrus jų kinetinės energijos virsta jų dalelių chaotiško judėjimo to kūno viduje energijomis. Panašu, kad Saulės sistemoje bent jau planetų, sudarytų iš uolienų, centrinės dalys yra taip įkaitusios, kad medžiaga išsilydo. Dėl šios priežasties medžiaga, sudaranti šias planetas, yra susisluoksniavusi į skirtingos cheminės sudėties ir tankio sluoksnius (žr. 23 skyrių, kur nagrinėjama Žemės struktūra).

Ir Saulė, ir jos planetos yra susidariusios beveik vienu metu. Saulės amžius vertinamas apie 5 milijardus metų (5×10^9 metų). Radioaktyviojo datavimo metodais ištirta, kad seniausieji Žemės ir Mėnulio kalnai yra apie 4,6 milijardų metų senumo.

Akrecijos modelio pagrindimas

Nėra labai daug įrodymų, kad planetos susidarė tiksliai pagal ką tik aprašytą scenarijų, tačiau visų žemiškųjų planetų ir daugelio palydovų paviršiuje stebimi dideli krateriai, susidarę dėl susidūrimų su kažkokiais masyviais kūnais, įvykusių jau atvėsus ir sukietėjus paviršiui (27.16 pav.). Yra tokių susidūrimų pėdsakų ir Žemės paviršiuje (1-os d. 57 p.), bet jie sunkiau aptinkami, nes Žemės paviršius kinta dėl plokščių tektonikos ir atmosferos poveikio ir dėl to, kad du trečdaliai jos paviršiaus padengta vandeniu.





27.16 pav. **Kairėje: Marso krateriai, nufotografuoti kosminių zondų Viking I ir II. Heigenso krateris, esantis į dešinę nuo centro, yra maždaug 500 km skersmens**
Dešinėje: Galilėjaus kosminio laivo nufotografuoti Mėnulio krateriai

Kodėl Saulės sistemoje egzistuoja dviejų rūšių planetos

Panagrinėkime ankstyvąsias kondensacijos, akrecijos ir susitraukimo stadijas. Pradinės stadijos Saulė sukėlė ją supančiose debesies srityse didelį temperatūrų gradientą. Visai arti Saulės galėjo sukietėti tik medžiagos, kurių lydymosi temperatūra pakankamai aukšta, bent jau aukštesnė kaip 400 ar 500 K; tai yra uolienos arba metalai. Tolstant nuo Saulės atsirado sritys, kur galėjo susidaryti ledo, o dar toliau – ir tokių elementų, kaip vandenilis, deguonis ar argonas, kietosios fazės.

Lengvos ir judrios dujų dalelės lengvai „nupučiamos“ tolyn nuo Saulės ne tik sklindančio iš jos spinduliavimo, bet ir **Saulės vėjo**, kurį sukelia galingas protonų ir elektronų srautas, sklindantis iš Saulės į visas puses dideliu greičiu.

Manoma, kad šis procesas prasidėjo dar Saulei būnant prožvaigžde. Būtent tada dėl to galėjo atsiskirti planetesimalės, sudarytos iš uolienų ir metalų, kurios liko arčiau Saulės, nuo planetesimalių, sudarytų iš ledo ir sušalusių dujų, kurios nuo jos nutolo.



H Pateikite įrodymų, kad planetos ir jų palydovai gali susidaryti vykstant akrecijai.

5 ŽVAIGŽDĖS: SAULĖ KAIP ŽVAIGŽDĖ

Saulė yra vidutinė žvaigždė. Jos svarbiausi duomenys pateikti 27.2 lentelėje.

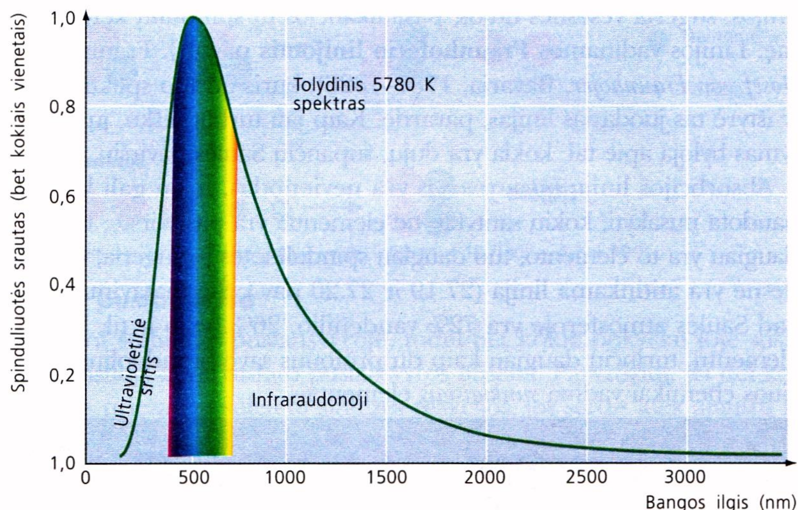
Saulės paviršiaus temperatūrą galima sužinoti dviem būdais:

- Jos spektras gali būti palygintas su *juodojo kūno spinduliavimo kreive* (žr. 29 p.)
- Jos energijos išeiga gali būti palyginta su Stefano ir Bolcmano spinduliuotės lygtimi (žr. 30 p.).

Saulės paviršiaus temperatūra, lygi 5780 K, atitinka juodąjį kūną, spinduliuojantį daugiausiai infraraudonojoje srityje, bet spinduliuotės maksimumas, atitinkantis 500 nm bangos ilgį, yra geltonai žalios spalvos.

Spindulys	$6{,}966 \times 10^8$ m
Masė	$1{,}989 \times 10^{30}$ kg
Spinduliuotės galia	$3{,}863 \times 10^{26}$ W
Paviršiaus temperatūra	5780 K
Šerdies temperatūra (įvertinimas)	$8–16 \times 10^6$ K
Vidutinis tankis	1410 kg m^{-3}
Amžius	$4{,}5–5 \times 10^9$
Paviršiaus elementų masės	Vandenilio – 72% Helio – 26% Kitų elementų –2%

27.2 lentelė. **Saulės parametrai**



27.17 pav. **Saulės tolydinės spinduliuotės spektras**

Kaip aprašyta 286 p., astronominio objekto *masė* gali būti randama pagal bet kokio jo palydovo judėjimą. Saulės *skersmenį* galima apskaičiuoti nustačius, kokiu kampu ji matoma, ir žinant atstumą iki jos, t. y. astronominį vienetą (AU). Šiuo matavimu nustatomas regimosios šviesios sferos, tai yra Saulės **fotosferos**, spindulys, lygus $7{,}0 \times 10^8$ m.

PAVYZDŽIAI

K Raskite vidutinį Saulės tankį

A Saulės vidutinis spindulys yra 7×10^8 m, taigi jos tūris lygus:

$v = 4/3\pi r^3$

$= 4/3 \times \pi \times (7{,}0 \times 10^8)^3$

$= 1{,}4 \times 10^{27}$ m^3

Jos masė yra $2{,}0 \times 10^{30}$ kg, taigi jos tankis

ρ = masė / tūris

$= 1{,}4 \times 10^3$ kg m^{-3}

Tai tik truputį daugiau už vandens tankį.

?

I Naudodamiesi duomenimis, pateiktais 27.2 lentelėje, raskite Saulės paviršiaus plotą.

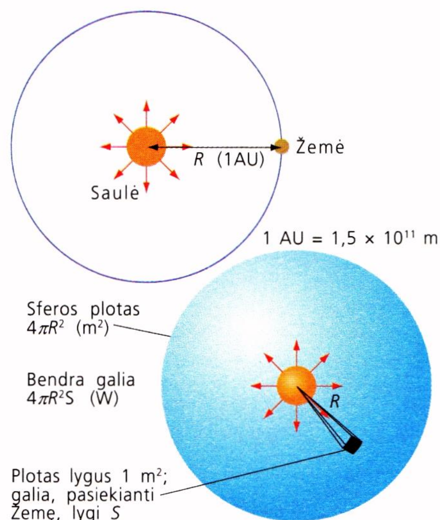
Saulės spindesys ir Saulės konstanta

Spindesys *L* yra lygus visos žvaigždės spinduliuotės energijai. Iš Žemės galime nustatyti, kad pasiekianti mus Saulės spinduliuotės energija lygi 1,370J į kvadratinį metrą per sekundę (arba W · m^{-2}). Šis dydis vadinamas **Saulės konstanta *S***. Žemės paviršių pasiekia šiek tiek mažesnė energija, nes dalį jos sugeria atmosfera.

Saulė spinduliuoja į visas puses vienodai, todėl jos spinduliuotė atitinka **atvirkštinių kvadratų dėsnį**, teigiantį, kad **intensyvumas** *I* lygus:

$$I \propto \frac{1}{r^2}$$

Visa Saulės spinduliuojama energija pralekia pro sferą, t. y. kurios spindulys lygus 1 AU, t. y. Žemės orbitai; o jos intensyvumas lygus $1{,}370 \times 10^3$ W/m^2. Taigi visa Saulės spinduliuojama energija gali būti apskaičiuota padauginus šį dydį iš tos didžiulės sferos ploto (27.18 pav.). Jis lygus $4\pi R^2 S$, kur *R* yra lygus 1 AU ($1{,}496 \times 10^{11}$ m).

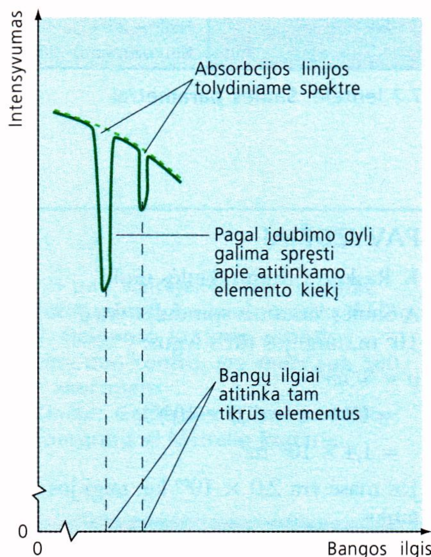


27.18 pav. **Saulės spinduliuotės galios matavimas**



J Naudodamiesi tekste pateiktais duomenimis įsitikinkite, kad Saulės spinduliavimo galia yra lygi 3,90 × 10^{26} W.

K Naudodamiesi tekste pateiktais duomenimis įvertinkite Saulės paviršiaus temperatūrą.



27.19 pav. **Absorbcijos (Fraunhoferio) linijos Saulės spektre**



L a) Kokios yra dvi svarbiausios Saulės spinduliuotės savybės?

b) Kuri šių savybių **(i)** leidžia išmatuoti jos paviršiaus temperatūrą, **(ii)** gali būti panaudota nustatyti Saulės atmosferos cheminei sudėčiai?

Žr. 10 klausimą. ■

Ši Saulės spindesio reikšmė gali būti panaudota jos paviršiaus temperatūrai rasti, kadangi ji tenkina Stefano ir Bolcmano spinduliavimo dėsnį:

$$L = \sigma A T^4 = 4\pi R^2 \sigma T^4$$

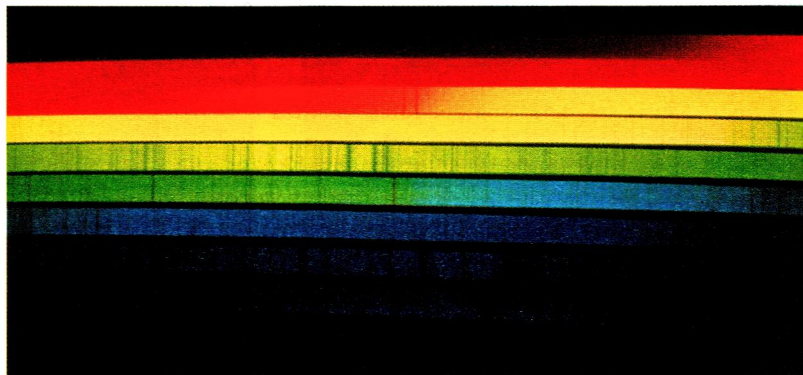
kur A yra Saulės paviršiaus plotas, o s – Stefano ir Bolcmano konstanta, lygi 5,57 × 10^{-8} W · m^{-2} · K^{-4}.

6 SAULĖ

Saulės sandara

Saulės emisijos spektras turi keletą juodų linijų (27.20 pav.). Jas galima paaiškinti tuo, kad tuos Saulės spinduliuotės dažnius, kuriuos žymi tos linijos, sugeria vėsesnės dujos, pasitaikančios tų spindulių kelyje į Žemę. Linijos vadinamos **Fraunhoferio linijomis** pagal J. Fraunhoferio (*Josef von Fraunhofer*, Bavaria, 1787–1826), kuris atrado spektroskopą ir ištyrė tas juodąsias linijas, pavardę. Kaip jau turbūt aišku, jų išsidėstymas byloja apie tai, kokia yra dujų, supančių Saulės paviršių, sudėtis.

Absorbcijos linijų *intensyvumas* yra nevienodas, ir tai gali būti panaudota nusakyti, kokiu santykiu tie elementai yra pasiskirstę; mat kuo daugiau yra to elemento, tuo daugiau spinduliuotės jis sugeria, tuo juodesnė yra atitinkama linija (27.19 ir 27.20 pav.). Šie matavimai rodo, kad Saulės atmosferoje yra 72% vandenilio, 26% helio ir tik 2% kitų elementų, turinčių daugiau kaip du protonus savo branduoliuose, kuriuos chemikai vadina *sunkiaisiais* elementais.



27.20 pav. **Saulės absorbcijos spektras; jame matyti daug juodų Fraunhoferio linijų, pagal kurias atskiriama Saulės paviršiuje esančių dujų sudėtis**

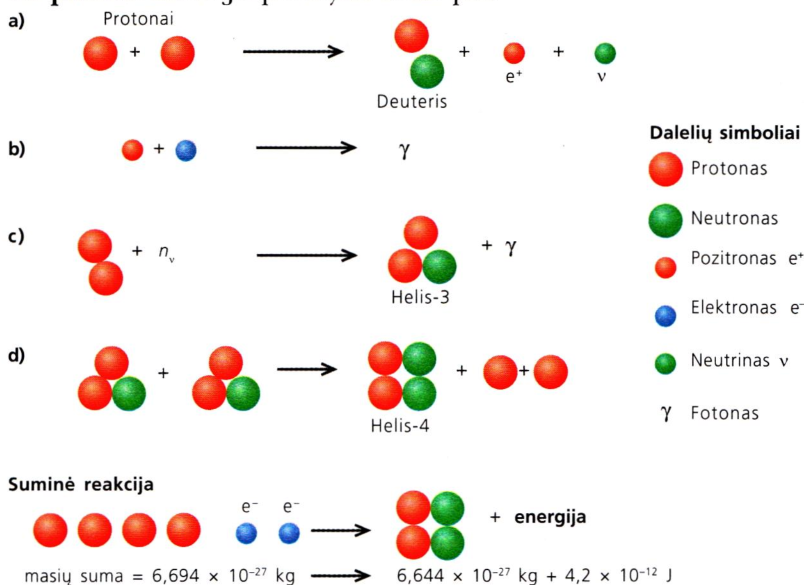
Saulė kaip energijos šaltinis

Saulės energija išsiskiria nuolatos joje vykstant **branduolinės sintezės** reakcijoms. Tai procesai, kurių metu labai didelių kinetinių energijų branduoliai susidūrimų metu sugeba įveikti *stūmą* ir suartėti tiek, kad tarp jų pradėtų veikti stiprioji branduolinė sąveika. Tik tokioms sąlygoms esant susijungę du lengvieji branduoliai gali sudaryti vieną sunkesnį ir išskirti milžiniškus energijos kiekius. Kad prasidėtų tokios reakcijos, dalelių temperatūra turi būti ne mažesnė kaip 10^7 K. Būtent tokia temperatūra (tiksliau – nuo 8 iki 16 milijonų Kelvino laipsnių) ir pasiekiama Saulės šerdyje.

Branduoliai yra labai maži, todėl vykstant jų sintezės reakcijoms gali būti išskiriama pakankamai energijos tik tada, kai plazmos tankis yra pakankamai aukštas, o susidūrimų skaičius – didelis. Saulės **plazmos** tankis yra 160 kartų didesnis už vandens tankį, jis lygus 1,6 × 10^5 kg/m^3. To pakanka, kad tos reakcijos vyktų intensyviai.

Sintezės reakcijos Saulėje

Procesas, kurio metu Saulėje vandenilis virsta heliu, vadinamas **protono–protono ciklu**. Jis parodytas 27.21 pav.



27.21 pav. **Protono–protono ciklas**

M Iš Einšteino sąryšio $E = mc^2$ raskite, kad spinduliavimo galiai $3{,}9 \times 10^{26}$ W užtikrinti Saulė turi prarasti savo masės, ne mažiau kaip 4 milijardus kilogramų per sekundę.

■ Žr. 11 ir 12 klausimus.

Saulės pusiausvyra

Saulė yra stabilioje pusiausvyroje, todėl bet kokie pokyčiai joje susikompensuoja ir vėl atstato pusiausvyros būseną. Pavyzdžiui, jei dėl kokių nors priežasčių sulėtėtų sintezės reakcijos, jos šerdis kiek atauštų ir daleles pradėtų veikti mažesnis slėgis. Tada suaktyvėtų gravitacijos jėgos, kurios vėl suaktyvintų traukimąsi, dalis potencinės energijos virstų kinetine, temperatūra kiek išaugtų, ir dėl to padidėtų energijos išsiskyrimo branduolinėse reakcijose greitis, karštesnės plazmos slėgis dėl to kiek padidėtų ir galų gale vėl atsistatytų balansas.

Saulės vidinė sandara

Galime stebėti tik Saulės išorę, jos fotosferą. Tai, kas vyksta viduje, galime tik sumodeliuoti kompiuteriu ir derinti modelio veikimą su stebėjimų rezultatais. Apytikslis pagrindinių Saulės parametrų, stebimų ir modeliuojamų, sąvadas pateiktas 27.22 pav.

Saulės šerdis

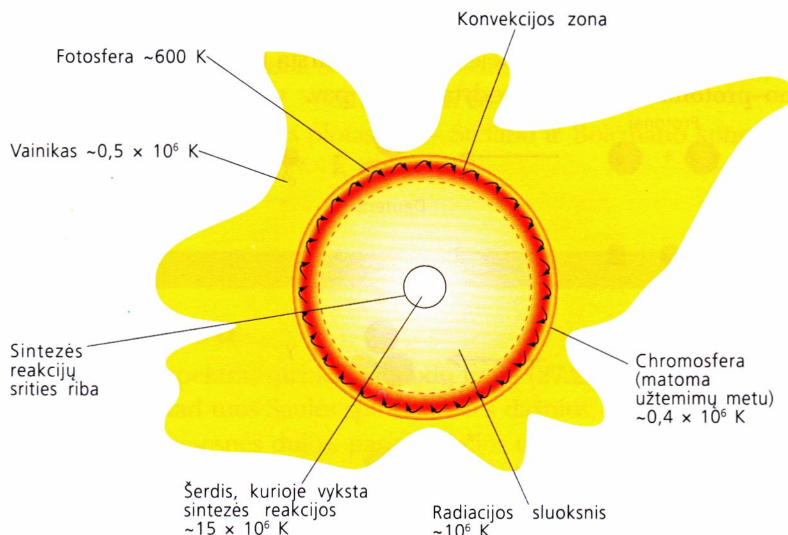
Šerdis – tai sritis Saulės centre, kur vykstant branduolinėms sintezės reakcijoms sukuriama energija, kuri sklinda į išorę pirmiausia kaip spinduliuotė, taip pat ir kaip konvekcinės srovės šaltesniuose išoriniuose sluoksniuose.

Šerdies spinduliuojamų fotonų energija yra labai didelė, tai daugiausiai rentgeno spinduliai. Fotonai juda šviesos greičiu, tačiau dėl didžiulio tankio toje srityje jų įveikiamą kelią labai riboja nuolatiniai susidūrimai su plazmos dalelėmis. Manoma, kad tarp eilinių susidūrimų šie fotonai spėja nuskrieti tik kokį milimetrą, ir jų kelias į Saulės paviršių trunka milijonus metų. Aišku, pasiekiantys paviršių fotonai esti visiškai pakitę palyginti su tais, kurie spinduliuojami šerdyje, ir todėl jie neteikia beveik jokios informacijos apie šerdies sandarą.

Konvekcijos zona

Branduolinės sintezės reakcijos nutrūksta, jei temperatūra tampa žemesnė už kokius 6 milijonus laipsnių, todėl srityje, kurioje yra sintezės re-

27.22 pav. **Saulės struktūra**



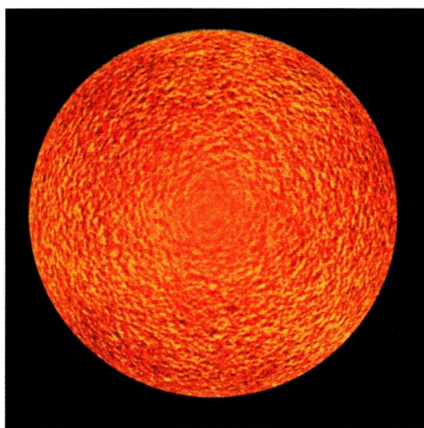
?

N Sritis, supanti Saulės šerdį, nepraleidžia spinduliuotės, todėl energiją joje iš esmės perneša konvekcinės srovės. Paaiškinkite, kodėl taip atsitinka. Palyginkite reiškinį su tuo, kas atsitinka kaitinant vandenį mikrobanginėje krosnelėje.

akcijų pakraščio zona, temperatūra staiga nukrinta iki maždaug milijono laipsnių. Didelių energijų fotonai, išspinduliuojami iš šerdies, pirmiausia aprūpina energija dujas, esančias **radiacijos sluoksnyje**, taigi jos įšyla.

Įkaitusios šios dujos plečiasi ir sukelia konvekcijos sroves; panašios susidaro prikaistuvyje ant viryklės šildomame vandenyje. Sritis, kurioje susidaro tos srovės, vadinama **konvekcijos zona**.

Šios zonos temperatūra yra jau ne itin aukšta, ir joje gali susidaryti vandenilio ir helio *atomai*. Fotonų joje taip pat yra, tačiau konvekcija čia efektingiau perneša energiją. Taip yra todėl, kad fotonai, sklindantys iš šerdies, yra absorbuojami tų atomų. Atomai susižadina arba netgi jonizuojasi, todėl ir konvekcijos zona nepraleidžia spinduliuotės.



27.23 pav. **Konvekcinės srovės išoriniame Saulės konvekcijos zonos paviršiuje. Nuotrauka padaryta iš SOHO kosminio zondo Doplerio efekto principu: tamsesnės sritys rodo karštesnes dujas, judančias į išorę, o šviesesnės sritys – vėsesnes dujas, judančias vidun**

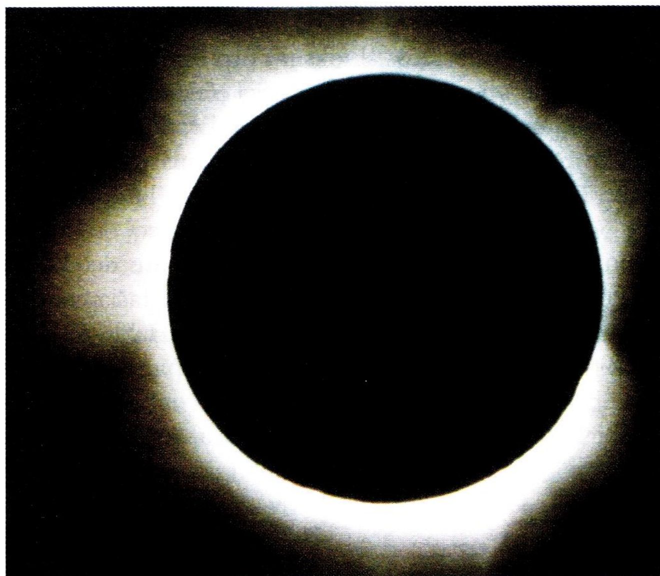
Fotosfera

Retėjant Saulės atmosferai konvekcija silpnėja, o ilgainiui ir visai nuslopsta. Dabar energija jau sklinda į išorę fotonų pavidalu. Kadangi jie susidaro konvekcijos zonos paviršiniame sluoksnyje, tai matyti iš Žemės. Tai **fotosfera** – ji pavaizduota 27.23 pav. Fotografuojant su filtru, praleidžiančiu tik aukštos temperatūros vandenilio atomų spinduliuojamą šviesą, ji atrodo tarsi nusėta šviesesnių ir tamsesnių grūdelių.

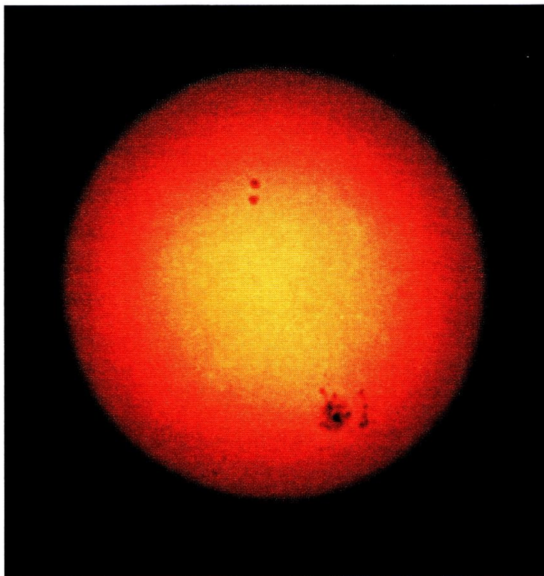
Chromosfera ir Saulės vainikas

Už fotosferos yra dar dvi sritys, kurios gali būti stebimos tik Saulės užtemimų metu. Pirmoji jų yra **chromosfera**, labai plona mažo tankio sritis. Ji matoma kaip rožinės spalvos blyksnis prasidedant užtemimui. Astronomai nustatė, kad chromosfera yra tik keleto tūkstančių kilometrų storio ir sudaryta daugiausiai iš vandenilio dujų, kurių tankis maždaug tūkstantį kartų mažesnis už fotosferos tankį. Tačiau chromosferos temperatūra yra daug aukštesnė, ji siekia 400 000 K, todėl dalelės joje juda kur kas greičiau. Kai kurios jų (daugiausiai protonai) būtent ir yra svarbiausi Saulės vėjo komponentai.

Užtemimo metu galima pamatyti dar kitą spinduliuojančią šviesą dujų zoną, vadinamą **vainiku** (27.24 pav.). Jo temperatūra siekia 500 000 K, ir jis spinduliuoja ne tik vandenilio, bet ir stipriai jonizuotų atomų – neono, kalcio, geležies ir nikelio, spektrų linijas. Vainiko forma rodo, kad ją veikia magnetinis laukas. Būtent jis gali suteikti tokias dideles energijas šiai gana retų dujų sričiai. Magnetinis laukas taip pat sąlygoja **Saulės dėmių** (27.25 pav.) aktyvumą.



27.24 pav. **Saulės vainikas užtemimo metu**



27.25 pav. **Saulės dėmės yra tamsios jos fotosferos sritys, vėsesnės nei pati fotosfera. Jas sukelia galingos magnetinės audros, o iš jų veržiasi liepsnos liežuviai. Vidutiniškai vienas toks liežuvis išspinduliuoja apie 10^{25} J energiją, ekvivalentišką 2 milijardų megatonų branduoliniam sprogimui. Tų liepsnų dalelės, atskriejusios į Žemę, sutrikdo radijo ryšius ir veikia atmosferą, kartais sukeldamos pasaulinius klimato pokyčius**

■ Žr. 13 ir 14 klausimus.

Kiek dar švies Saulė?

Saulės šerdis yra sudaryta iš maždaug 40% vandenilio ir 60% helio. Be to, tik apie 10% viso Saulės vandenilio yra jos šerdyje. Šie kiekiai negali būti *išmatuoti* – tai teorinių samprotavimų ir skaičiavimų gana patikimi rezultatai. Visam šerdies vandeniliui pavirtus heliu, protono–protono ciklas nutrūktų ir mūsų Saulė nustotų gyvuoti. (309 p. aprašyta, kas gali atsitikti nutrūkus šiam ciklui).

Modeliai rodo, kad šerdyje šiuo metu dar yra likę apie 10^{29} kg vandenilio, kuris gali virsti heliu. Vykstant šiam virsmui, tik 0,7% vandenilio masės virsta *spinduliavimo energija*. Tai reiškia, kad Saulė, vartodama turimą šerdyje vandenilį, gali energija paversti masę, lygią 7×10^{26} kg.

Žinome, kad Saulė spinduliuoja $3{,}9 \times 10^{26}$ W energijos, arba $1{,}2 \times 10^{34}$ J per metus. Vadinasi, per metus ji praranda masės:

$$\Delta m = \frac{E}{c^2} = \frac{1{,}2 \times 10^{34}}{9 \times 10^{16}} = 1{,}33 \times 10^{17} \text{ kg per metus}$$

Taigi, apytiksliais duomenimis, Saulė gali deginti savo šerdyje likusį vandenilį dar $(7 \times 10^{26})\,(1{,}33 \times 10^{17}) = 5 \times 10^{9}$ metų.

7 ĮRODYMAI

Visą informaciją apie gamtą, Saulės sistemos susidarymą, žvaigždes, ūkus ir galaktikas gauname tyrinėdami elektromagnetinės spinduliuotės, pasiekiančios mus iš kosmoso, spektrus. Labai ilgai visi mūsų teleskopai buvo Žemės paviršiuje, todėl pasiekianti juos spinduliuotė būdavo „košiama" atmosferos, kuri yra skaidri tik kai kuriems spektro dažniams. Atmosfera sugeria beveik visą infraraudonosios, Rentgeno ir ultravioletinės srities spinduliuotę. Be to, kituose diapazonuose ji gali iškreipti stebėjimų rezultatus būdingu jai **„triukšmu"**.

Turbulencija, mirgėjimas ir matymas

Turbulencija žemutinių atmosferos sluoksnių oro duobėse paveikia sklindančią iš žvaigždžių šviesą – jos „mirga". Šis efektas trikdo kokybišką vaizdą netgi galingiausiuose teleskopuose. Tai vadinama **„blogu matymu"**. Dėl šios priežasties observatorijas stengiamasi įrengti kuo aukščiau kalnuose, kad atmosferos sluoksnis virš prietaisų būtų kuo plonesnis.

Blogo matymo galima išvengti iškėlus prietaisus, skirtus detektuoti pačių įvairiausių dažnių spinduliuotę, į Žemės palydovus (tačiau tai nepigus metodas). Galingiausias tokio tipo prietaisas yra Hablo teleskopas, paleistas 1990 m. Jis labai papildė mūsų žinias apie žvaigždes ir Visatą.

Žr. 15 ir 16 klausimus. ■

Pagrindiniai teleskopų fizikos principai išdėstyti ir aptarti 19 skyriuje.

8 ŠIUOLAIKINIAI TELESKOPAI

Paprastas Niutono reflektorius (19.37 pav.) yra dažniausiai naudojamas teleskopas. Vaizdas susidaro fotografinėje plokštelėje arba (šiuo metu tai labiau įprasta) elektroniniame detektoriuje. Šis vaizdas niekada nėra geras dėl trijų pagrindinių priežasčių:

- Dėl **difrakcijos** taškinis žvaigždės ar kito objekto atvaizdas „išskysta" į dėmę.
- Dėl **„blogo matymo"** prarandama vaizdo detalių, kai oro srovės atmosferoje sukelia detektorių pasiekiančios spinduliuotės mirgėjimą.
- **„Grūdėtumas"** atsiranda dėl to, kad detektorius turi ribotas galimybes išskirti smulkias detales. Tai gali atsitikti ir dėl fotografinės plokštelės šviesai jautrių chemikalų grūdelių, ir dėl detektorių skiriamosios gebos.

Apskritai svarbiausia didelių Žemės teleskopų problema yra „blogas matymas". Dauguma astronomų su tuo kovoja naudodami **„aktyvią optiką"**: greitai veikiantį šviesos jutiklį, sujungtą su kompiuteriu, kuris gali kaitalioti mažo, paslankaus *koreguojančio veidrodžio* formą, kad atvaizdas būtų kiek galint mažesnis ir erdvėje nekistų. Šis metodas naudojamas Europos Pietų observatorijoje Čilėje įrengtame tokio tipo 3,5 m skersmens teleskope (27.26 pav.), taip pat ir kituose didžiausiuose pasaulio teleskopuose-reflektoriuose, kurių vienas yra Kecko teleskopas Mauna Kea observatorijoje Havajuose (19.38 pav.).





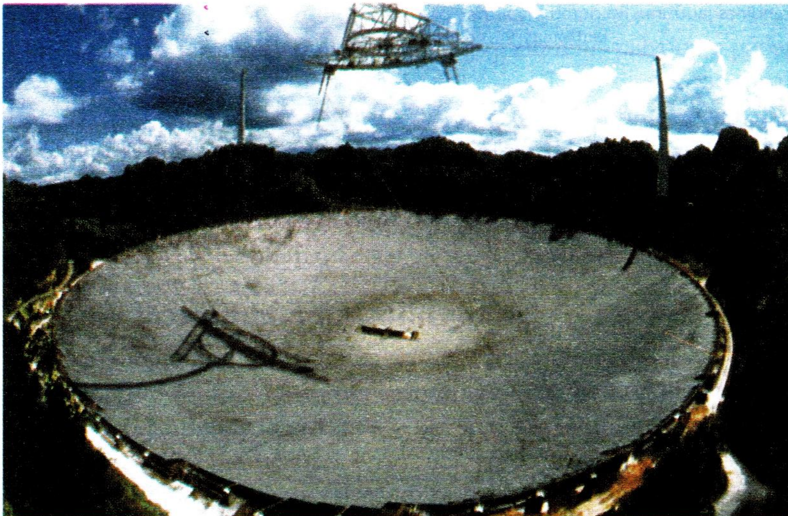
27.26 pav. **Kairėje: Europos Pietų observatorija Čilėje, La Silla vietovėje. Pastatuose įrengti įvairūs teleskopai. Dešinėje: Europos Pietų observatorijos 3,5 m skersmens Naujųjų technologijų teleskopas. Jame vaizdą nustato valdoma kompiuterio optika. Tai ypač veiksminga kokybiškiems tolimų blankių galaktikų atvaizdams gauti**

Radioteleskopai

Naudojami dviejų tipų radioteleskopai – su **lėkščių pavidalo antenomis** ir su **tiesine antenų grandine**.

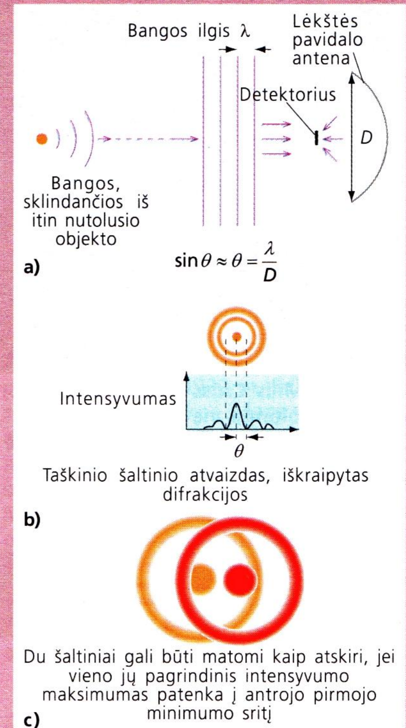
Teleskopai su lėkščių pavidalo antenomis veikia panašiai kaip ir teleskopai–reflektoriai, kuriais siekiama sutelkti kiek galint didesnio intensyvumo signalą su kiek galint didesne skiriamąja geba. Tačiau, skirtingai nuo įprastų teleskopų, jie dirba daug ilgesnių nei regimosios bangų diapazone, jų detektorius yra suderintas kontūras, o ne fotografinė plokštelė, kaip optiniame teleskope.

Didžiausia tokia antena yra įrengta natūraliame įdubime Arecibo vietovėje Puerto Rike. Jos skersmuo 305 m. Šis teleskopas gali detektuoti tik signalus, kurie pasiekia jį iš erdvės sričių, esančių tiesiai virš lėkštės, todėl sukantis Žemei jo apžvelgiama sritis visą laiką kinta. Teleskopai, kuriuos galima nukreipti į bet kokį objektą, esantį virš jų horizonto, ir jį sekti, ta prasme yra daug pranašesni, bet turi būti žymiai mažesni. Didžiausias jų yra 100 m diametro skersmens Makso Planko institute Vokietijoje, netoli Bonos miesto.



27.27 pav. **Arecibo (Puerto Riko) radijo observatorija. Lėkštė sutelkia atspindėtas radijo bangas į priėmimo anteną, esančią 130 metrų aukštyje**

Kuo didesnis signalo bangos ilgis, tuo didesnė yra dėmė, atsirandanti dėl difrakcijos. Kritinę jos vertę sąlygoja difrakcijos parametras θ, parodytas 27.28 pav.



27.28 pav. **Atvaizdai visada iškraipomi dėl spindulių difrakcijos**

■ Žr. 17 klausimą.

Difrakcija

Difrakcija labai pablogina tikslumą, kuriuo bet kokiu teleskopu galima nustatyti kokio nors objekto padėtį. Lėkštė, kurios skersmuo lygus 100 bangos ilgių, gali užfiksuoti objektą, matomą 1 laipsnio kampu, o tai daug didesnis kampas už žvaigždžių matymo kampus. Radijo astronomijoje dažniausiai naudojamas 0,21 m bangos ilgio radijo bangų, skleidžiamų molekulinio vandenilio, diapazonas. Taigi pirmaisiais nuo 25 iki kokių 50 m skersmens radioteleskopais buvo neįmanoma tikslumu, palyginamu su optinių teleskopų tikslumu, nustatyti žvaigždžių, spinduliuojančių tokias radijo bangas (**radijo žvaigždžių**), padėtį. Žvaigždžių grupių, išsidėsčiusių maždaug 0,5 kampinių sekundžių atstumu, atvaizdams sudaryti reikėtų lėkštės, kurios skersmuo sudarytų ne mažiau kaip 50 000 bangos ilgių.

?

O a) Kokio skersmens teleskopu, veikiančiu 0,21 m ilgio bangų diapazone, galima pamatyti kaip skirtingus objektus du radijo bangų šaltinius, nutolusius vienas nuo kito 0,5 sekundės kampu. (1 kampinė sekundė lygi 1/3600 laipsnio daliai, arba 4,85 × 10^{-6} rad).

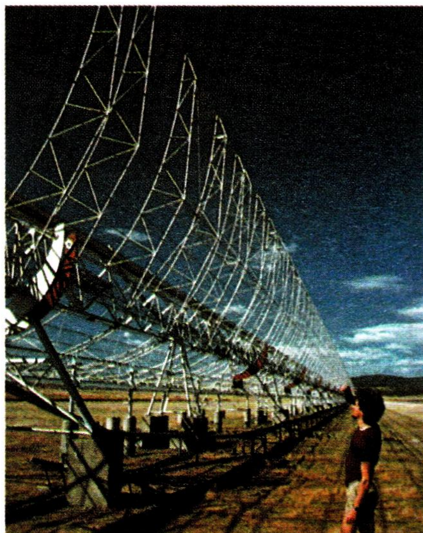
b) Nurodykite **(i)** du galimus „triukšmo“, t. y. iškraipytų signalų, šaltinius radioteleskope, ir **(ii)** du jų sumažinimo būdus.

Priimama galia

Kuo didesnė lėkštė, tuo daugiau energijos teleskopas gali priimti per sekundę. Priimama galia yra proporcinga lėkštės plotui, taigi:

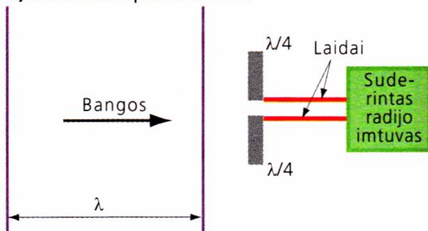
$$\text{priimama galia} \propto (\text{lėkštės skersmuo})^2$$

■ Žr. 18 klausimą.

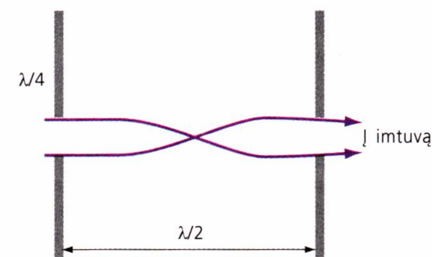


27.29 pav. **Mills Cross'o radioteleskopo, kuris yra Molongo vietovėje netoli Kanberos, Australijoje, antenų grandinė**

a) Suderinta dipolinė antena



c) Dviejų antenų grandinė. Jos išdėstytos pusės bangos ilgio atstumu





27.31 pav. **ROSAT vaizdas orbitoje (piešinys, ne nuotrauka). Jis paleistas 1990 metais. Jame yra tolimojo ultravioletinio ir rentgeno diapazono teleskopas.Tikimasi, jis galės atrasti daugiau kaip 100 000 naujų rentgeno spindulių šaltinių. Spinduliuotę į detektorių šiame teleskope sufokusuoja keturi koncentriniai mažo kritimo kampo paviršiai, kurių židinio nuotolis lygus 2,4 m**

Reflektoriaus glotnumas

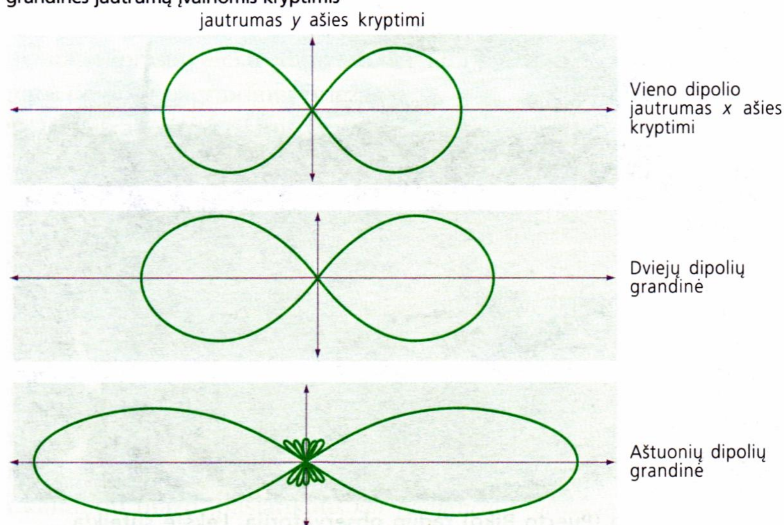
Radioteleskopo lėkštė gaminama iš metalo, kuris atspindi radijo signalus panašiai kaip sidabru padengtas paviršius atspindi šviesą. Paviršius nebūtinai turi būti vientisas, jis galėtų būti pagamintas nors ir iš vielų tinklo, svarbu tik kad atstumai tarp vielų būtų ne mažesni kaip viena dvidešimtoji mažiausio detektuojamo bangos ilgio. (Prisiminkite šio skyriaus įvadą.)

Laidinės antenos

Paprasčiausia antena yra metalinis laidas, kuriame elektromagnetinės bangos elektrinė dedamoji indukuoja **signalo įtampą** (prisiminkite 16.3 pav.). Signalas stipriausias tuomet, kai antenos ilgis yra suderintas su elektromagnetinės bangos ilgiu. Tokiu atveju banga **rezonuoja** antenoje – ji vadinama suderintąja. Tokios dipolinės antenos naudojamos buitiniuose prietaisuose – radijo aparatuose ir televizoriuose.

Šiuolaikinės kompiuterių programos gali dar ir pakoreguoti šį signalą, pridėdamos prie jo kitu metu gautus signalus, sustiprindamos tikrąjį signalą ir panaikindamos triukšmus.

b) Naudojant grandinę pagerėja ir kryptingumas, ir jautrumas. Polinės diagramos rodo grandinės jautrumą įvairiomis kryptimis



27.30 pav. **Laidinės antenos. Dipolinė antena yra kryptinė. Patekusio signalo atvaizdas parodytas polinėje diagramoje. Antenos efektingumas ir kryptingumas gali būti pagerinti panaudojant grandinėje daugiau nei vieną dipolį**

Astrofizikų teleskopai: gama spindulių, Rentgeno spindulių, ultravioletinės ir infraraudonosios spinduliuotės

Atmosfera, sugerianti didelę dalį elektromagnetinio spinduliavimo, trukdo stebėti kosmoso ultravioletiniame, rentgeno spindulių ir infraraudonųjų spindulių diapazonuose, todėl šiam tikslui naudojami oro balionai, aukštai skraidantys lėktuvai, kosminės laboratorijos ir palydovai.

Rentgeno spindulių teleskopas pirmą kartą paleistas į kosmosą 1970 m. Uhuru palydovu, ROSAT teleskopas pradėjo darbą 1990 m.; yra dar keletas vėlesnių, taip pat įdomių projektų artimiausiai ateičiai. Didžiausia problema stebint šiuos spindulius yra ta, kad juos labai sunku sufokusuoti – jie arba sklinda kiaurai medžiagą, arba yra joje sugeriami. Įprastas veidrodinis reflektorius yra visiškai neefektingas, panašiai kaip ir lęšis. Vis tik išeitis rasta. Spinduliai, krintantys į juos mažais kampais, yra fokusuojami tolydžio mažėjančio skersmens cilindrais. Toliau pasiaiškinsime, kad rentgeno spindulių šaltiniai yra glaudžiai susiję su **juodųjų skylių**, aprašytų 315 p., detektavimo problema.

Gama spinduliai yra dar skvarbesni ir už rentgeno spindulius, todėl atmosfera jiems netrukdo pasiekti Žemės paviršių, tačiau yra ne tik įrengtų ant Žemės paviršiaus (kaip Whipple observatorijos Arizonoje 10 m skersmens teleskopas), bet ir nusiųstų į Žemės orbitą gama teleskopų (Gama spindulių observatorija, daugkartinio vartojimo kosminio laivo pakelta į orbitą 1991 m.).

Karštosios žvaigždės, kurių paviršiaus temperatūra yra didesnė nei 10 000 K, daugiausiai spinduliuoja **ultravioletinius** spindulius. Stebėjimai šioje srityje teikia daug informacijos apie tų žvaigždžių sudėtį ir sritis, kuriose susidaro naujos žvaigždės (27.32 pav.). Kadangi ultravioletiniai spinduliai yra sugeriami atmosferoje, daugumai tyrimų naudojami prietaisai, pakelti į Žemės orbitą. Netgi Hablo teleskope yra įtaisas ultravioletiniams spinduliams stebėti.

Infraraudonoji astronomija, naudojanti stebėjimo iš Žemės priemones, yra ribojama labai siauros bangų juostos, kuri nėra sugeriama atmosferos anglies dioksido ir vandens garų. Be to, šiuos įrenginius keblu eksploatuoti dar ir dėl to, kad reikia dirbti labai žemose temperatūrose, artimose absoliučiam nuliui (apie 2,5 K).

1983 metais infraraudonųjų spindulių astronominis palydovas padarė viso dangaus žemėlapį bangų ilgių nuo 12 iki 57 μm diapazone. Jis rado apie 250 000 infraraudonosios spinduliuotės šaltinių – žvaigždžių, galaktikų ar dujų debesų. Buvo pastebėtos ir šešios kometos. Kai kurie šių šaltinių gali būti erdvės sritys, turtingos dujų ir dulkių, kuriose susidaro jaunos žvaigždės, nes debesis dėl gravitacinio traukimosi, kaip žinome, pirmiausia įkaista (žr. 288 p.).



27.32 pav. **Šis atvaizdas yra gautas ultravioletinio diapazono teleskopu, paleistu į orbitą 1990 m. Tai yra spiralinės galaktikos Messier 81, esančios Didžiųjų Grįžulo ratų žvaigždyne, atvaizdas ultravioletinėje srityje. Galaktika yra maždaug 9 milijonų šviesmečių atstumu. Šviesios dėmės rodo sritis, kuriose yra susidariusių naujų žvaigždžių**

■ Žr. 19, 20 ir 21 klausimus.



P a) Kokie du pagrindiniai veiksniai lemia vaizdo, gaunamo astronominiais teleskopais, ryškumą? Pasiūlykite du būdus tiems atvaizdams koreguoti.

b) (i) Ar detektoriuose turi būti atsižvelgta į šviesos banginės arba dalelinės struktūros ypatybes? **(ii)** Kokias elektromagnetinio spektro sritis galima stebėti detektoriais, pagrįstais banginėmis spinduliuotės savybėmis?

c) Kodėl dideli teleskopai statomi ant aukštų kalnų arba siunčiami į kosmosą?

Foninis kosminis spinduliavimas

Pats įspūdingiausias ir reikšmingiausias infraraudonosios astronomijos atradimas yra **foninis kosminis spinduliavimas**, sklindantis beveik visiškai vienodai iš visų Visatos taškų. Šio spinduliavimo intensyvumo pasiskirstymas yra būdingas 2,7 K temperatūros juodojo kūno skleidžiamai spinduliuotei. Manoma, kad tai priminimas ir vienas pagrindinių įrodymų Didžiojo Sprogimo, nuo kurio prasidėjo Visata. (Nors jis kartais vadinamas „mikrobangininiu“, iš tiesų atitinkami bangų ilgiai yra veikiau milimetrų, nei mikrometrų diapazone). Jis buvo aptiktas 1964 m. kaip „triukšmas“, trikdantis signalus šiame trumpų bangų diapazone. Daugiau informacijos apie jį rasite 28 skyriuje.

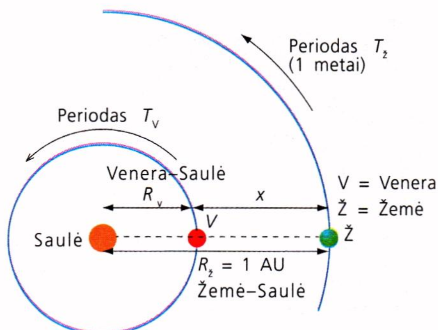
9 ĮRODYMŲ PANAUDOJIMAS

Astronominių atstumų matavimas

Astronominiai atstumai yra labai dideli ir sunkūs įsivaizduoti. Netgi pačių bendriausių kosmologijos teorijų (28 skyrius) išvados priklauso nuo to, kaip tiksliai išmatuojami atstumai iki tolimų Visatos sričių. Pradėta nuo atstumo iki Saulės matavimo.

Astronominio vieneto (AU) matavimai

Atstumai mokslininkų matuojami šviesos sekundžių vienetais; norint geriau suvokti, kartais jie pervedami į įprastinius vienetus, tokius kaip metrai. Tai aprašyta 2 skyriuje. Astronomai tam naudoja pirmiausia atstumą nuo Žemės iki Saulės, tai yra astronominį vienetą, žymimą AU, taip pat parseką (pc) (tai jau parodyta 27.3 pav.).



Pagal trečiąjį Keplerio dėsnį:

$$R_{\text{Ž}} = R_V \infty \left(\frac{T_{\text{Ž}}}{T_V}\right)^{\frac{2}{3}} \text{.......[1]}$$

Atstumas nuo Žemės iki Veneros $x = R_Ž - R_V$
taigi $R_V = R_Ž - x$
ir iš [1] lygties gauname:

$$R_{\text{Ž}} = (R_{\text{Ž}} - x)\left(\frac{T_{\text{Ž}}}{T_V}\right)^{\frac{2}{3}}$$

Kadangi x, $T_Ž$ ir T_V yra žinomi, $R_Ž$ (1AU) gali būti surastas

27.33 pav. **Astronominio vieneto matavimas**

Kaip matuojami atstumai iki ypač tolimų objektų, aiškinama 28 skyriuje

Remiantis trečiuoju Keplerio dėsniu galima tiksliai apskaičiuoti Saulės sistemos atstumų **santykius**. Pagal šį dėsnį bet kurios planetos T^2/R^3 = const, čia T yra planetos orbitinis periodas, o R – vidutinis jos atstumas nuo Saulės. Dėsnis išplaukia iš Niutono gravitacijos ir judėjimo dėsnių (286 p.). Taigi palyginę Žemės ir Veneros santykius:

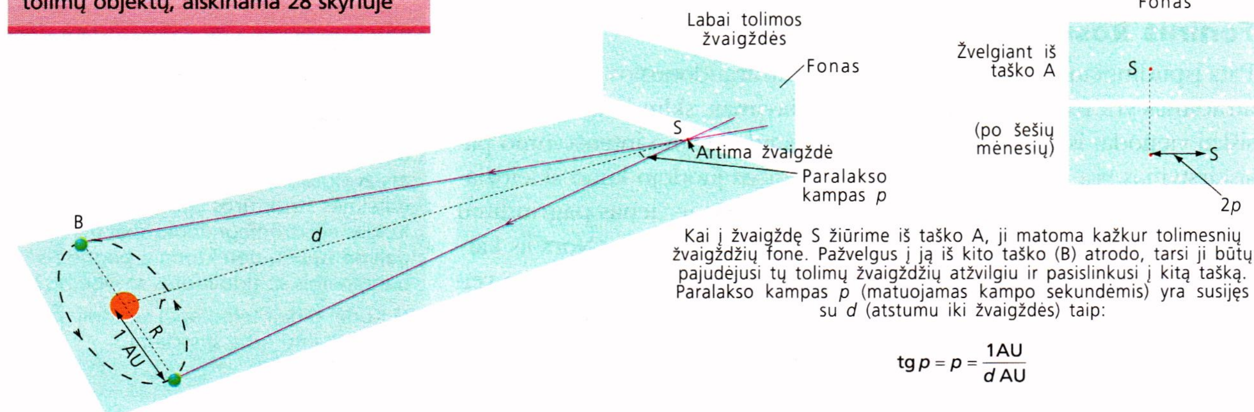
$$\frac{T_{\text{Ž}}^{\ 2}}{R_{\text{Ž}}^{\ 3}} = \frac{T_V^{\ 2}}{R_V^{\ 3}}$$

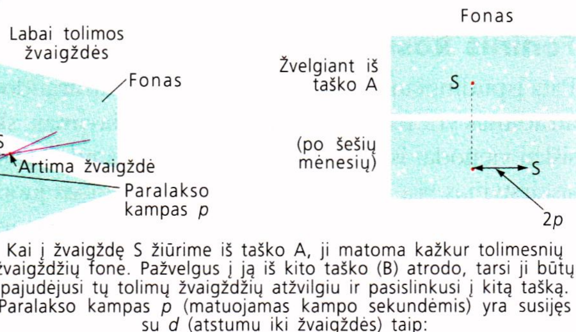
ir juos pertvarkę gauname: $R_{\text{Ž}}^{\ 3} = 1\,\text{AU} = \left(\frac{T_{\text{Ž}}}{T_V}\right)^2 \times R_V^{\ 3}$

Planetų orbitiniai periodai yra žinomi labai tiksliai, todėl AU galima rasti žinant atstumą nuo Saulės iki Veneros, arba nuo Žemės iki Veneros. Pastarasis gali būti išmatuotas radaru (1-os d. 11 p.), todėl belieka tik atlikti keletą matematinių veiksmų, pateiktų 27.33 pav.

Atstumų iki žvaigždžių matavimas

Atstumai iki artimųjų žvaigždžių gali būti išmatuoti **paralakso** metodu, aprašytu 1-os d. 12 puslapyje. Naudojant šį metodą tenka matuoti „žvaigždės matymo" kampą, t. y. kampų, kuriais žvaigždė matoma tolimesnių žvaigždžių fone Žemei esant dviejuose priešinguose savo orbitos taškuose, skirtumą. Atstumas tarp šių taškų lygus 2 AU, tai ir yra bazė, parodyta 27.34 pav. Visata yra tokia didelė, kad ši bazė yra pakankama daugiau ar mažiau tiksliai išmatuoti tik atstumams iki artimiausių žvaigždžių.





Kai į žvaigždę S žiūrime iš taško A, ji matoma kažkur tolimesnių žvaigždžių fone. Pažvelgus į ją iš kito taško (B) atrodo, tarsi ji būtų pajudėjusi tų tolimų žvaigždžių atžvilgiu ir pasislinkusi į kitą tašką. Paralakso kampas p (matuojamas kampo sekundėmis) yra susijęs su d (atstumu iki žvaigždės) taip:

$$\text{tg}\,p = p = \frac{1\text{AU}}{d\,\text{AU}}$$

$$\text{arba}\ d = \frac{1}{p}\ \text{parsekų}$$

27.34 pav. **Paralaksas ir parsekas**

Paralakso kampas net ir šiuo atveju yra labai mažas; artimiausios žvaigždės paralakso kampas lygus 0,772 **kampinių sekundžių**. Tai sudaro apie 0,2 tūkstantąsias kampo laipsnio. Jei p matuojamas radianais, tai

$$p \text{ radianų} = R/d = 1/d \text{ AU, kadangi } R = 1\text{AU}$$

Taigi

Atstumas iki žvaigždės $d = 1/p$ AU, jei p yra išmatuotas radianais.

Astronomai šį kampą matuoja ne radianais, o kampinėmis sekundėmis; sekundė yra šešiasdešimtoji kampinės minutės dalis, o minutė – šešiasdešimtoji laipsnio dalis. Tokiu atveju atstumas iki žvaigždės išreiškiamas **parsekais**:

$$d = 1/p \text{ parsekų, jei } p \text{ išmatuotas kampo sekundėmis.}$$

Parsekas yra patogesnis vienetas atstumams matuoti, nes jis tiesiog susijęs su matuojamais dydžiais. Be to, jis yra gerokai didesnis už AU, taigi geriau tinka astronominiams atstumams išreikšti.

1 parsekas = $3{,}09 \times 10^{16}$ m = $2{,}06 \times 10^{5}$ AU = 3,26 šviesmečių

Paralakso matavimams reikalinga labai tiksli technika. Pavyzdžiui, Sirijus yra gana artima žvaigždė, nutolusi tik 0,38 pc atstumu. Norint išmatuoti tokį kampą, lygų 0,38 arcsec, reikia maždaug tokio tikslumo, kaip matuojant 10 centų monetos skersmenį, esant už penkių kilometrų nuo jos. Mažiausias kampas, kurį galima šiuo būdu išmatuoti, yra ne didesnis kaip 0,001 arcsec. Todėl šis metodas tinka tik artimiausiomis žvaigždėmis.

Saulė yra **Paukščių Tako** galaktikoje. Jos skersmuo lygus 25 000 pc, taigi daugumos žvaigždžių atstumai nuo mūsų yra didesni nei tie, kuriuos galima matuoti paralakso metodu.

? Q Įrodykite, kad vieno parseko atstumas lygus $2{,}06 \times 10^{5}$ AU.

R a) Kokiu atstumu, išreikštu (i) pc, (ii) AU, yra žvaigždė, kurios paralakso kampas lygus 0,001 arcsec?

b) Kokį didžiausią atstumą galima išmatuoti naudojantis paralaksu?

■ Žr. 22 klausimą.

Temperatūra

Žvaigždės temperatūra laikoma jos *paviršiaus*, t. y. fotosferos, temperatūra. Dauguma žvaigždžių spinduliuoja tolydinį spektrą, kuris atitinka Planko *juodojo kūno spinduliuotės* dėsnį (žr. 31 ir 291 p.).

Astronomai, tirdami žvaigždės spektrą, matuoja spinduliuotės intensyvumus esant tam tikriems fiksuotiems bangų ilgiams (anksčiau tam buvo naudojamos fotografijos, dabar daroma naudojantis elektronika). Išmatavus ir palyginus su Planko (juodojo kūno) kreive galima nustatyti, kokia yra žvaigždės paviršiaus temperatūra (žr. 17.1 pav.). Dar paprasčiau būtų rasti, kokį bangos ilgį λ_{max} atitinka didžiausio spektro intensyvumo taškas. Jį radus galima pasinaudoti Vyno dėsniu (žr. 29 p.):

$$\lambda_{max} T = 2{,}898 \times 10^{-3} \text{ mK}$$

Astronominių objektų temperatūros kinta nuo truputį aukštesnių už absoliutųjį nulį iki šimtų tūkstančių laipsnių. Kitaip sakant, intensyvumo maksimumai kinta nuo radijo iki rentgeno bangų diapazonų.

Žvaigždės spindesio, arba jos spinduliuojamos energijos, matavimai

Žvaigždės **spindesys *L*** lygus visai per sekundę jos spinduliuojamai energijai. Taigi jis matuojamas vatais. Kadangi plintant spinduliuotei, jos intensyvumas kinta atvirkščiai proporcingai atstumo kvadratui, energija, per sekundę atnešama į kiekvieną Žemės paviršiaus kvadratinį metrą, vadinama **srauto tankiu *F***; ji lygi:

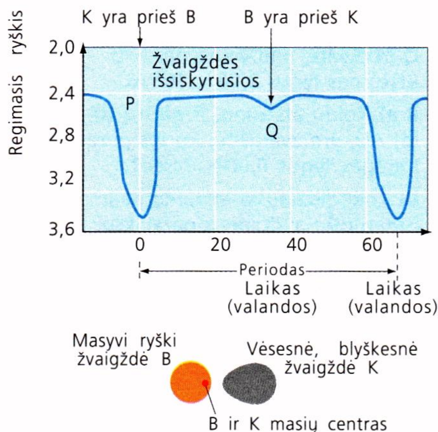
$$F = \frac{L}{4\pi d^2}$$

kur d yra žvaigždės atstumas metrais. Nors F yra visų dažnių spinduliočių suma, tai vis tik labai mažas dydis. Be to, jį labai sunku išmatuoti, nes daugumos žvaigždžių spektro didžioji dalis yra sukoncentruota ultravioletinėje srityje, o šiuos spindulius, kaip žinome, labai sugeria Žemės atmosfera. Be to, dalis spinduliuotės gali būti sugerta pasitaikančių jos kelyje tarpžvaigždinių dujų ir dulkių debesų, taigi matavimo tikslumas gali tik dar sumažėti.

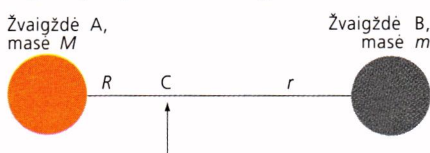
Žvaigždžių masės matavimai

Labiausiai netikėta, ko gero, yra tai, kad astronomai gali nustatyti žvaigždžių, nutolusių tokiais didžiuliais atstumais, mases. Dar labiau įspūdinga yra tai, kad galima išmatuoti mases žvaigždžių, kurios yra iš viso nematomos! Masių matavimo metodai pagrįsti **dvinarių žvaigždžių**, kurios juda viena apie kitą, judėjimo tyrimais.

■ Žr. 23 klausimą.



27.35 pav. **Algolo, dvinarės žvaigždžių sistemos Persėjaus žvaigždyne, regimojo ryškio kitimo grafikas**



27.36 pav. **C yra dvinarės žvaigždžių sistemos masių centras. Įsivaizduokite du svorius, balansuojančius ant svirties: $MR = mr$**

Žr. 24 klausimą. ■

Viena kitą užtemdančios dvinarės

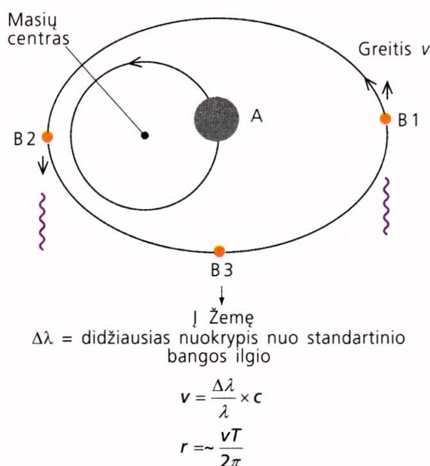
Algolo žvaigždės ryškis periodiškai kinta; per keletą valandų jis pakinta nuo maksimalaus iki minimalaus ir atvirkščiai (27.35 pav.). Taip atsitinka todėl, kad Algolą sudaro ne viena, o dvi žvaigždės, viena ryškesnė už kitą, besisukančios apie bendrą masių centrą. Taigi jos periodiškai viena kitą užstoja, o kadangi abi žvaigždės ir Žemė yra toje pačioje plokštumoje, regimasis jų suminis ryškis nuolatos kinta. Didžiausias ryškis yra tuomet, kai abi žvaigždės yra matomos. Kai blyški žvaigždė K atsiranda prieš ryškią B, ji „užtemdo" pastarąją ir ryškumas labiausiai sumažėja – paveikslėlyje jis pažymėtas raide P. Taške Q ryškis vėl sumažėja, nors ir ne taip smarkiai. Tuo momentu ryški žvaigždė B „užtemdo" blyškiąją.

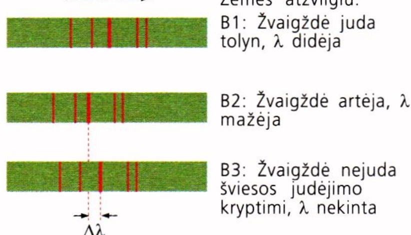
Dauguma žvaigždžių sudaro nedideles grupes, dažniausiai jos yra susigrupavusios po dvi. Tokios žvaigždės juda apie bendrą masių centrą, kuris dviejų žvaigždžių sistemai parodytas 27.36 pav.

Jei abi žvaigždės yra matomos, galima stebėti jų abiejų judėjimą ir išmatuoti kiekvienos periodus. Mažesnioji žvaigždė yra toliau nuo masių centro, todėl ji juda lėčiau, ir jos orbitinis periodas yra didesnis. Praktiškai dauguma dvinarių žvaigždžių yra arti viena kitos, todėl tie periodai dažniau matuojami valandomis, nei paromis arba metais.

Žvaigždžių sukimosi periodus lemia jų masės ir atstumai nuo masių centro. Šiuos dydžius galima susieti naudojantis trečiuoju Keplerio dėsniu (286 p.), judesio kiekio tvermės dėsniu ir Niutono judėjimo dėsniais.

Jeigu tokia žvaigždžių sistema yra gana arti Žemės, tai stebint teleskopais jų judėjimą, galima išmatuoti kiekvienos jų periodą ir orbitos spindulį. Skaičiavimai bus pateikti vėliau.





27.37 pav. **Naudodamiesi Doplerio poslinkiu raskite vienos spektroskopinės dvinarės žvaigždės greitį**

Žr. 25 ir 26 klausimus. ■

Spektroskopinės dvinarės

Dauguma dvinarių žvaigždžių sistemų yra arba labai toli nuo Žemės, arba juda taip arti viena kitos, kad teleskopais neįmanoma jų išskirti. Tačiau panagrinėjus tokio šviesulio spektrą galima rasti jame *dvi absorbcijos linijų grupes*, būdingas skirtingoms žvaigždėms. Šios absorbcijos linijos atsiranda todėl, kad vėsioje žvaigždės atmosferoje esantys elementai sugeria kai kurių bangų ilgių spindulius (292 p.).

Taip pat galima išmatuoti kiekvienos šių linijų grupės **Doplerio poslinkį**. Jei viena žvaigždžių juda link mūsų, spektro dažniai padidėja (bangų ilgiai sumažėja). Žvaigždei judant nuo mūsų, dažniai mažėja (bangų ilgiai didėja). Bangos ilgio pokyčio santykis su pradine jos reikšme yra proporcingas žvaigždės judėjimo greičiui:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c}$$

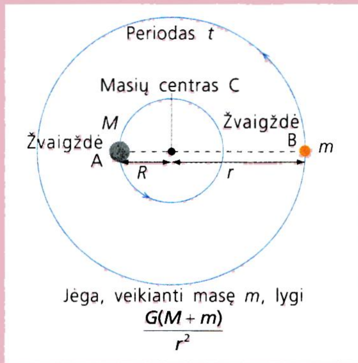
Tai leidžia išmatuoti kiekvienos dvinarės sistemos žvaigždės greitį ir orbitinį periodą. Šie gali būti panaudoti jų atstumams, tuo pačiu ir kiekvienos žvaigždės masei nustatyti.

Pateiktas čia ir kiek žemiau paprastas matematinis šių problemų aprašymas grindžiamas prielaida, kad žvaigždžių orbitos yra apskritimai, o Žemė yra jų judėjimo plokštumoje. Tos prielaidos ne visada pagrįstos, tačiau tiksliau aprašyti būtų pernelyg sudėtinga.



S Kodėl žvaigždės labiau linkusios jungtis į dvinares ar dar didesnes sistemas, nei likti pavienės kaip Saulė? Kodėl to nepastebime žiūrėdami į dangų?

Žvaigždžių masių matavimai



27.38 pav. Dvinarės sistemos žvaigždžių judėjimo schema. Didesnioji žvaigždė yra A, jos masė *M*, mažesnioji – B, jos masė *m*. Schema pavaizduota masių centro C sistemoje. (Žvaigždėms judant juda ir šis taškas)

Dydžiai, reikalingi žvaigždžių masei išmatuoti, nurodyti 27.38 pav. Sistemos efektinė masė, lygi masių sumai, veikia taip, tarsi ji būtų masių centre. Taigi nagrinėdami mažesniosios žvaigždės B judėjimą, kai ji juda spindulio r apskritimu apie masių centrą, galime pritaikyti Niutono dėsnius:

Gravitacijos jėga lygi masei, padaugintai iš įcentrinio pagreičio:

$$\frac{G(M+m)m}{r^2} = \frac{mv^2}{r}$$

Gauname:

$$v^2 = \frac{G(M+m)}{r} \qquad [1]$$

Taigi jei žvaigždės yra pakankamai arti Žemės ir atstumas iki jų tiksliai išmatuotas, išmatavę kampus galime rasti r, taip pat rasti v arba iš spektroskopinių duomenų (Doplerio efektas) arba, jei žinomas apsisukimo periodas, iš išraiškos:

$$v = \frac{2\pi r}{t} \qquad [2]$$

Pasinaudoję šiomis reikšmėmis, iš [1] formulės galime gauti žvaigždžių masių sumą:

$$(M+m) = \frac{v^2 r}{G} = \frac{4\pi^2 r^3}{Gt^2} \qquad [3]$$

Artimoms dvinarėms galima išmatuoti netgi abiejų žvaigždžių, mažosios ir didžiosios, atstumus nuo masių centro r ir R. Pasinaudoję judesio kiekio tvermės dėsniu ir iš jo išplaukiančiu masių centro apibrėžimu (27.36 pav.), galime rasti jų sąryšį:

$$MR = mr \qquad [4]$$

Dabar jau nesunku iš [3] ir [4] lygčių sistemos rasti kiekvienos žvaigždės masę M (A) ir m (B).

Praktiškai patogiausia atstumus matuoti astronominiais vienetais AU, laiką – Žemės metais, o masę – Saulės masėmis. Tokiu atveju skaičiavimai bus visai paprasti, jei turėsime ir G reikšmę šiais vienetais.

Panagrinėkime **Saulės ir Žemės sistemą**: Jos r = 1 AU, Žemės apsisukimo periodas lygus 1 metams, o Žemės masė lygi m. Saulės ir Žemės masių suma beveik tiksliai gali būti aproksimuojama Saulės mase, nes Žemės masė, palyginus su ja, yra labai maža.

Taigi iš [3] lygties gauname Saulės masės ir G sąryšį

$$M_0 = \frac{4\pi^2 r^3}{GT^2}$$

Iš čia galime išreikšti G, nes kiti šios lygties parametrai (r ir T) pasirinktoje vienetų sistemoje yra lygūs vienetui. Taigi,

$$M_0 = 4\pi^2 / G$$

Ir

$$G = 4\pi^2 / M_0 \qquad [5]$$

Tarkime, turime dvinarę žvaigždžių sistemą, kurios r lygus 16 AU, R lygus 4 AU, ir žinomas mažesniosios žvaigždės apsisukimo periodas t, lygus 30 metų. Kokios šių žvaigždžių masės?

Iš [4] lygties gauname: $M = 4m$, taigi $M + m = 5$m.

Iš [3] lygties gauname:

$$(M+m) = 5m = \frac{4\pi^2 r^3}{Gt^2} = \frac{4\pi^2 r^3}{t^2} \times \frac{M_0}{4\pi^2} = \frac{r^3}{t^2} M_0 \qquad [6]$$

Taigi

$$5m = \frac{16^3}{30^2} M_0$$

O tai reiškia, kad mažesniosios žvaigždės masė lygi 0,91 Saulės masės, o didesniosios – 3,7 Saulės masės.

Gal ir atpažinote daugiklį r^2/t^3, esantį [6] lygtyje; jis lygiai toks pat, koks yra ir trečiajame Keplerio dėsnyje (286 p.). Rezultatas, kurį pateikiame [5] lygtyje, galėtų būti taip pat gautas tiesiogiai iš šio dėsnio. Čia jį išvedėme iš pirminių principų tik tam, kad jūs dar kartą prisimintumėte Niutono dėsnių taikymus.

Spektroskopinės dvinarės

Šios žvaigždės jau yra per toli, kad kiekvienai jų būtų galima išmatuoti orbitų spindulius r ir R, bet, kaip minėta, gali būti nustatyti jų orbitiniai greičiai ir apsisukimo periodai. Tokiu atveju orbitų spindulius tenka išreikšti per žinomus v ir t, nes $r = vt/2\pi$ ([2] lygtis), ir vietoj [6] lygties gauname:

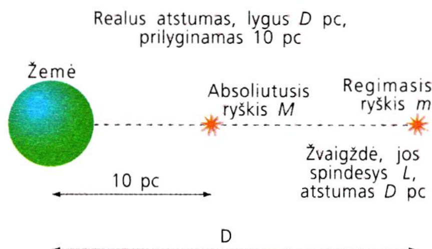
$$(M+m) = \frac{v^3 t}{2\pi} M_0 \qquad [7]$$

Kaip ir anksčiau, iš čia nesunkiai gauname abi mases, išreikštas Saulės masėmis.



T Naudodamiesi [2] ir [6] lygtimis išveskite [7] lygtį.

U Koks skirtumas tarp užtemdančių viena kitą ir spektroskopinių dvinarių sistemų? Kokie pagrindiniai astronominiai duomenys gali būti pateikti apie šias sistemas?



Galia (spinduliuotė), registruojama detektoriaus:

$$P = \frac{L}{4\pi D^2} \text{ į m}^2$$

Galia, kuri būtų registruojama, jei žvaigždė būtų 10 pc atstumu:

$$P = \frac{L}{4\pi (10)^2} \text{ į m}^2$$

Taigi

$$\frac{\text{„absoliučioji" galia į kvadratinį metrą}}{\text{išmatuotoji galia į kvadratinį metrą}} = \frac{D^2}{100}$$

Logaritminėje ryškių skalėje tai prilygsta:

$$M = m + 5 - 5 \log D$$

27.39 pav. **Regimasis ir absoliutusis ryškis**

10 ŽVAIGŽDŽIŲ TIPAI

Saulė yra būdinga žvaigždė, nes ji skleidžia ir regimąją, ir neregimąją spinduliuotę, sukeltą jos šerdyje vykstančių termobranduolinių reakcijų. Termobranduolinės reakcijos žvaigždėje prasideda tik tada, kai tankis ir temperatūra jos šerdyje pasiekia tam tikras reikšmes. Tai gali įvykti tik tada, kai dujų debesis, iš kurio susidarė žvaigždė, yra pakankamai didelis, kad gravitacijos jėgos galėtų sukaupti jame pakankamai energijos. Jei ta masė yra per maža, tai gims tik šilta žvaigždė, spinduliuojanti infraraudonajame diapazone, o temperatūra jos šerdyje neviršys 10^7 laipsnių. Tokios žvaigždės vadinamos **rudosiomis nykštukėmis**.

Netgi naudodamiesi galingiausiais teleskopais, galime atskirti žvaigždes tik pagal jų spalvą ir ryškį, tačiau ir šių dviejų parametrų pakanka jų klasifikacijai.

Spalva

Žvaigždės spalvą lemia jos spinduliuojamos regimojo spektro dalies intensyvumų santykis. Kaip jau išsiaiškinome, žvaigždės emisijos spektras gali būti panaudotas jos *paviršiaus temperatūrai* nustatyti. Visa žvaigždės spinduliuojama energija nusakoma jos **spindesiu**; jis priklauso ne tik nuo žvaigždės temperatūros, bet ir nuo jos dydžio.

Regimasis ir absoliutusis ryškis

Šiuolaikinis **regimojo žvaigždės ryškio** apibrėžimas pagrįstas jos spindesio, t. y. energijos, spinduliuojamos regimosios šviesos diapazone, matavimais. Ryškis nurodomas logaritminėje skalėje ir parenkamas taip, kad kiek galima labiau sutaptų su seniau atliktų stebėjimų plika akimi rezultatais. Žvaigždės regimasis spindesys (stebimos Žemėje žvaigždės spinduliuotės intensyvumas) matuojamas naudojant fotografines plokšteles arba šviesos jutiklius. Taip išmatuojamas **regimasis žvaigždės ryškis**.

Žmogaus akis geba išskirti tik žvaigždes, iki 100 kartų blyškesnes už ryškiausias. Ryškio reikšmę m susitarta žymėti taip, kad žvaigždės spindesiui mažėjant jos vertė auga nuo $m = 1$ iki $m = 6$. Ši skalė reiškia, kad 2-ojo ryškio žvaigždė yra 2,51 karto ryškesnė už 3-iojo ryškio žvaigždę. Yra 5 žingsniai tarp blyškiausių (m lygus 6) ir ryškiausių (m lygus 1) žvaigždžių, taigi 1-ojo ryškio žvaigždė yra ryškesnė už 6-ojo ryškio žvaigždę

$2{,}51 \times 2{,}51 \times 2{,}51 \times 2{,}51 \times 2{,}51 = (2{,}51)^5 = 100$ kartų. Šiuolaikiniais prietaisais įmanoma aptikti net mažesnio nei $m = 23$ ryškio žvaigždes. 27.3 lentelėje nurodyta, kiek galima danguje pamatyti žvaigždžių, kurių ryškis didesnis už nurodytą.

Ryškis	Skaičius žvaigždžių, kurių ryškis didesnis už nurodytą
5	1620
10	324 000
15	32 000 000
20	1 000 000 000 (10^9)

27.3 lentelė

Dėl mūsų klimato ir atmosferos ypatumų nelengva stebėti net žvaigždes, kurių $m = 5$.

Absoliutusis ryškis

Žvaigždės ryškis, jei ji būtų nutolusi nuo Žemės 10 pc nuotoliu, vadinamas jos **absoliučiuoju ryškiu**. Ryškiausia matoma žvaigždė, kurios ryškis lygus 1, yra toliau nei 10 pc atstumu nuo Žemės, taigi jei ji būtų nutolusi šiuo standartiniu atstumu, būtų dar ryškesnė. Jeigu ji būtų, tarkime, dar 2,51 kartų ryškesnė, jos regimasis ryškis būtų lygus *nuliui*. O jeigu jos ryškis būtų keturis kartus didesnis, ji taptų –3-iojo ryškio objektu. (Matematiniai rezultatai yra nepriklausomi nuo fizinių galimybių.)

Žinoma, niekas negali „sukelti" visų žvaigždžių į šį standartinį atstumą, tačiau galima apskaičiuoti, kokios ryškios jos būtų tokiu atveju. Formulė, išreiškianti žvaigždės, nutolusios nuo Žemės D parsekų atstumu, absoliutųjį ryškį M sieja su regimuoju m šitaip:

$$M = \mathrm{m} + 5 - 5 \log D$$

Ryškis: regimasis ir absoliutusis

Senovės graikų astronomas Hipparchas 102 metais pirmasis išmatavo žvaigždžių charakteristikas ir suklasifikavo jas į šešias **ryškio klases**.

Pirmosios klasės žvaigždės buvo pačios ryškiausios, o *šeštosios klasės* – pačios blyškiausios, vos matomos akimi labai giedrą naktį.

Astronomai dar ir dabar naudojasi žvaigždžių ryškio idėja, nors skiriami **regimasis** ir **absoliutusis ryškiai** (304 p.). Žvaigždė gali atrodyti esanti labai ryški vien dėl to, kad ji yra netoli Žemės, nors iš tikrųjų yra maža ir blyški. Kita vertus, taip pat kaip ši gali atrodyti ir labai ryški, bet tiek pat tolima žvaigždė.

Žvaigždės spinduliuojama šviesa sklinda pagal atvirkštinių kvadratų dėsnį, t. y. energija, krintanti į tą patį plotelį per tą patį laiką, yra atvirkščiai proporcinga atstumui iki tos žvaigždės. Taigi nutolusių nuo Žemės įvairiausiais atstumais žvaigždžių regimasis ryškis nėra susijęs su tuo, kokia skaisti ta žvaigždė yra iš tikrųjų. Norint jas palyginti, reikia apskaičiuoti, kaip ta žvaigždė šviestų, jei ji būtų **standartiniu 10 pc (32,6 šviesmečių) atstumu** nuo Žemės. Būdama tiek nutolusi, Saulė būtų klasifikuojama kaip gana blyški 4,9 ryškio žvaigždė.

?

V Žvaigždės, vardu Spika, atstumas $D = 67$ pc, o $m = 1,0$. Pasinaudokite tekste pateikta formule ir įrodykite, jog jos absoliutusis ryškis lygus –3,1.

W Koks skirtumas tarp regimojo ir absoliučiojo ryškio? Paaiškinkite, kam reikalinga absoliučiojo ryškio sąvoka.

■ Žr. 27, 28 ir 29 klausimus.

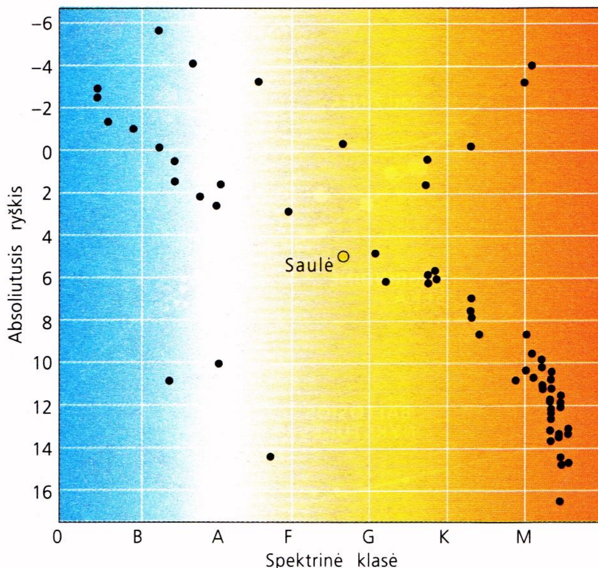
11 HERCŠPRUNGO IR RASELO DIAGRAMA

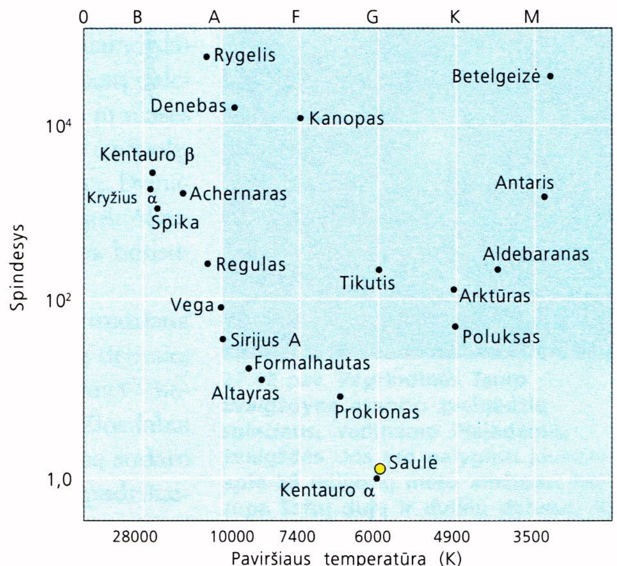
1913 m. H. Raselas (*Henry Norris Russell*, JAV, 1877–1957) sugalvojo labai svarbią diagramą, atidėjęs joje žvaigždžių absoliučiojo ryškio *M* priklausomybę nuo jų **spektrinės klasės**. Karštos mėlynos žvaigždės priklauso spektrinei klasei, žymimai raide O, mažiau mėlynos ir ne tokios karštos – spektrinei klasei B, geltonai baltos žvaigždės, tokios kaip Saulė, priskiriamos klasei G ir t. t.

Raselo diagrama atrodo panaši į pateiktą 27.40a) pav. Hercšprungas (*Ejnar Hertzsprung*, Danija, 1873–1967) tą diagramą kiek patobulino, atsižvelgdamas į tai, kad žvaigždės paviršiaus temperatūra susijusi su jos spalva. Dabar diagrama vadinama **Hercšprungo ir Raselo diagrama**, arba sutrumpintai H-R diagrama.

Šiuolaikiniai astronomai vietoje absoliučiojo ryškio atideda žvaigždės *spindesį*, o vietoj spektrinių klasių – žvaigždžių paviršiaus temperatūras, kaip parodyta 27.40b) pav. Diagramos ypatumas yra tai, kad temperatūros atidedamos ašyje ne taip, kaip įprasta, o *mažėjimo* iš kairės į dešinę tvarka.

27.40 pav. **Kairėje: Kai kurių ryškiausių ir artimiausių žvaigždžių absoliutieji ryškiai ir spektrinės klasės Dešinėje: Hercšprungo ir Raselo diagramos dalis, kurioje yra ryškiausios žvaigždės**





Spalva	Mėlynai balta	Mėlynai balta	Mėlynai balta	Melsvai balta, balta	Balta iki geltonai baltos	Geltonai oranžinė	Rusvai oranžinė
Spektrinė klasė	O	B	A	F	G	K	M
Paviršiaus temperatūra	30 000	11 000–30 000	7 500–11 000	6 000–7 500	5 000–6 000	3 500–5 000	apie 3 500

27.4 lentelė **Ryšys tarp žvaigždės temperatūros ir jos spektrinės klasės**

Galima manyti, kad kuo karštesnė yra žvaigždė, tuo ji ir ryškesnė. Apskritai, tai galioja daugeliu atvejų, bet Hercšprungas atrado, kad kai kurios žvaigždės nusižengia šiai taisyklei. Kai kurios jų buvo labai ryškios, bet tik rusvos, o tai reiškia – gana šaltos. Jis suvokė, kad taip gali būti tuo atveju, kai tokia žvaigždė yra labai didelė. Akivaizdu, kad žvaigždė, spinduliuojanti net ir nedaug energijos iš kiekvieno paviršiaus plotelio, gali būti ryški, jei jos paviršiaus plotas yra pakankamai didelis.

?

X a) Kodėl manoma, kad baltos spalvos žvaigždės yra karštesnės už raudonąsias? **b)** Kaip gali būti, kad kai kurios raudonosios žvaigždės yra tokio pat ryškio, kaip ir mėlynosios?

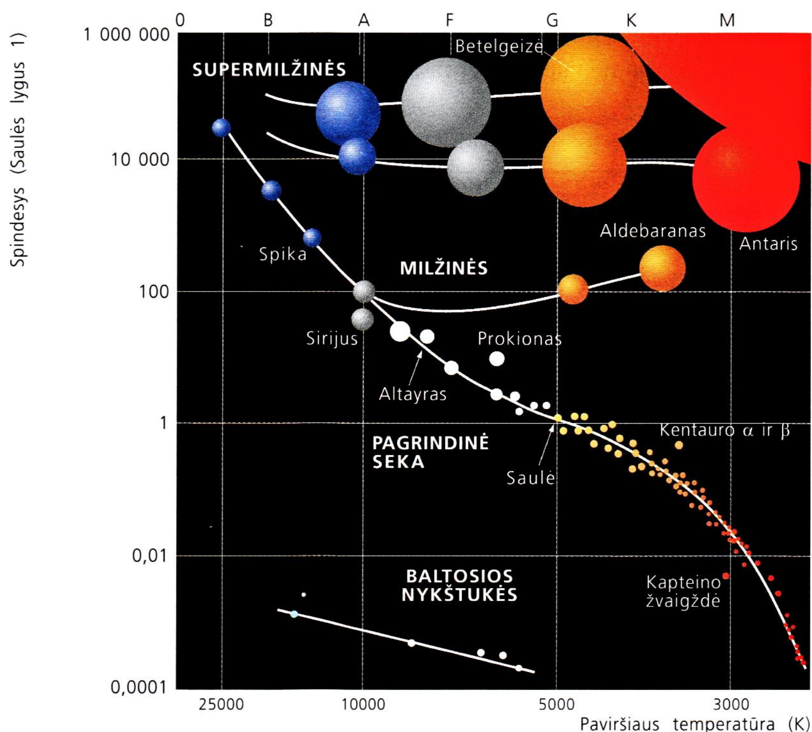
Žr. 30 ir 31 klausimus. ■

Tipiška tokia žvaigždė yra Betelgeizė, esanti Oriono žvaigždyne. Ji 20 000 kartų ryškesnė už Saulę, nors jos paviršiaus temperatūra yra tik 3100 K. Ji tokia didelė, kad jei atsidurtų Saulės vietoje, užimtų visą erdvę iki Marso orbitos. Tokios žvaigždės vadinamos **raudonosiomis milžinėmis**.

Yra ir mėlynai baltų žvaigždžių, kurių spindesys labai mažas; tai reiškia, kad jų paviršiaus plotas yra itin mažas. Jos vadinamos **baltosiomis nykštukėmis**.

Žvaigždžių grupės H-R diagramoje

Žvaigždės H-R diagramoje, 27.41 pav., susiskirsčiusios į tris pagrindines grupes. Diagramos viršuje dešinėje yra ryškios, bet gana vėsios žvaigždės. Jos ryškios todėl, kad yra labai didelės, priklausančios **supermilžinių** ir **milžinių** grupėms. Diagramos apačioje kairėje yra **baltosios nykštukės** – žvaigždės, kurių paviršiaus temperatūra gana aukšta, nuo 6000 K iki 20 000 K, tačiau dėl mažo paviršiaus ploto jos yra blyškios. Dauguma žvaigždžių diagramoje išsidėsčiusios išilgai apytikrės įstrižainės iš viršutinio kairiojo, kur yra labai karštos (mėlynai baltos) žvaigždės, į apatinį dešinįjį kampą, kur yra blyškios ir vėsios (rusvai baltos) žvaigždės. Visos jos priklauso **pagrindinei sekai**. Visos pagrindinės sekos žvaigždės yra palyginti nedidelės. Saulė yra būdinga pagrindinės sekos žvaigždė.



27.41 pav. **Žvaigždžių grupės atitinkamai Hercšprungo ir Raselo diagramai**

Visos pagrindinės sekos žvaigždės yra nedidelės, tačiau jų masės vis dėlto kinta nuo vienos penktosios Saulės masės iki maždaug 40 Saulės masių. Žvaigždės padėtį pagrindinėje sekoje daugiausiai lemia jos masė ir amžius. Vėliau paaiškinsime, kodėl taip yra. 27.5 lentelėje parodytos pagrindinės kai kurių būdingų šios sekos žvaigždžių savybės.

27.5 lentelė. **Kai kurių pagrindinės sekos žvaigždžių savybės**

Spektrinė klasė	Pavyzdys	Paviršiaus temperatūra (K)	Masė (Saulės = 1)	Spindesys (Saulės = 1)	Spindulys (Saulės = 1)	Laukiamas gyvavimo laikas/ milijonai metų
O	Naos	40 000	40	500 000	20	1
B	Spika	15 000	7	800	4	80
A	Sirijus	11 000	2	26	2	2500
F	Prokionas	6600	1,3	2,5	1,2	5000
G	Saulė	5800	1	1	1	10 000
K	Aldebaranas	4300	0.78	0,16	0,7	20 000
M	Keletas kitų	3300	0,21	0,01	0,3	50 000

Kodėl didelės ir karštos žvaigždės yra retos

Žvaigždžių kataloguose yra pateikti daugelio tūkstančių žvaigždžių duomenys. Dauguma jų yra nykštukės, išsidėsčiusios šaltesniosiose pagrindinės sekos srityse ir esančios netoli nuo Saulės. Didelės ir karštos žvaigždės pasitaiko labai retai. Taip yra todėl, kad kuo žvaigždė karštesnė, tuo trumpesnis jos amžius (žr. 27.5 lentelę).

Karštos žvaigždės, kurios yra susidariusios Saulės aplinkoje tuo pat metu, kaip ir ji (maždaug prieš 5 milijardus metų), jau yra nustojusios aktyviai spinduliuoti. Mat kuo didesnė žvaigždės masė, tuo didesnė būna temperatūra jos šerdyje. Galioja maždaug tokia taisyklė, kad padvigubėjus žvaigždės masei jos gaminamos energijos kiekis išauga dešimt kartų. Taigi ji naudoja savo branduolinį kurą dešimt kartų greičiau ir dėl to trumpiau gyvena. Kad suprastume šio reiškinio priežastis, turime dabar išsiaiškinti, kaip **žvaigždės susidaro** ir **evoliucionuoja**.

12 ŽVAIGŽDĖS GYVENIMAS IR MIRTIS

Žvaigždės susidarymas

Manoma, kad visos žvaigždės susidaro taip pat, kaip jau aprašyta Saulės atsiradimo scenarijuje, t. y. dėl gravitacijos kolapsuojant didžiuliam ir labai masyviam dujų debesiui su nedidele dulkių, t. y. smulkių kietų dalelių, priemaiša. Šie debesys gali būti kelių šviesmečių dydžio, o jų masės turi būti pakankamos susidaryti žvaigždėms, daug masyvesnėms už Saulę.

Iš didelių debesų greičiau susidaro kelios žvaigždės nei viena. Dvinarės žvaigždės Paukščių Take yra labai dažnos. Pavyzdžiui, Sirijus, Algolas, Tikutis, Kentauro Alfa ir Kastoras yra dvigubos žvaigždės, besisukančios apie bendrą masių centrą.

Sutinkamos taip pat ir žvaigždžių grupės, kurių amžius yra maždaug toks pat ir jos yra susidariusios iš to paties labai didžiulio dujų debesies beveik vienu metu. Būdingas pavyzdys yra **Plejadės** (27.42 pav.) – nedidelis žvaigždynas, kuriame netgi plika akimi matomos šešios labai šviesios jaunos žvaigždės. Teleskopu matyti, kad šį žvaigždyną sudaro apie šimtas žvaigždžių. Tokios žvaigždžių grupės vadinamos **padrikaisiais spiečiais**. Kai kurie jų yra nelabai toli nuo Saulės, todėl stebimi netgi pro gerus žiūronus palieka didelį įspūdį. (Pažvelkite dar kartą į



27.42 pav. **Pagrindinės Tauro žvaigždyne esančio žvaigždžių spiečiaus, vadinamo Plejadėmis, žvaigždės. Jos yra palyginti jaunos – apie 50 milijonų metų amžiaus. Jas supa šaltų dujų ir dulkių debesis, likęs nuo spiečiaus susidarymo. Matoma šviesa, atsispindėjusi nuo to debesies**

27.11 pav., kur matyti debesies, iš kurio jau formuojasi žvaigždės, nuotrauka infraraudonųjų spindulių diapazone.)

Įėjimas į pagrindinę seką

Nauja ir karšta *prožvaigždė* gauna savo energiją iš gravitacinio kolapso. Prasidėjus branduolinės sintezės reakcijoms, ji atsiranda pagrindinės sekos vietoje pagal jos spindesį ir temperatūrą. Ji tampa pagrindinės sekos žvaigžde, kurios *amžius lygus nuliui*. Žvaigždės atsiradimas pagrindinėje sekoje reiškia, kad joje nusistovi pusiausvyra tarp energijos gamybos ir spinduliavimo procesų bei ji nustoja trauktis. Kaip ilgai ji gali išlikti šioje būsenoje?

Masės ir spindesio ryšys

Palyginus su Saule, ryški A klasės žvaigždė, tokia kaip Sirijus, yra du kartus masyvesnė, taigi turi du kartus daugiau vandenilio, iš kurio gali semtis energijos. Tačiau Sirijaus amžius yra trumpesnis už Saulės, o tai reiškia, kad ji spinduliuoja savo energiją daugiau kaip du kartus greičiau negu Saulė. Apskritai žvaigždės spindesys yra proporcingas jos masei trečiuoju laipsniu:

$$L \propto M^3$$

Kadangi žvaigždės energija proporcinga jos masei, tai

$$E = \text{konstanta} \times M = k_1 M \qquad [1]$$

Kadangi spindesys lygus energijos praradimo greičiui $\Delta E/\Delta t$, tai galima parašyti:

$$\Delta E/\Delta t = k_2 M^3 \qquad [2]$$

kur k_2 yra dar kita konstanta. Žvaigždė būna pusiausvyroje beveik visą savo amžių, taigi jos energijos spinduliavimo greitis yra beveik pastovus. Akivaizdu, visas žvaigždės energijos pokytis nuo jos gimimo iki visiško sudegimo lygus visai jos energijai, o laikas, reikalingas tai energijai išspinduliuoti, lygus jos amžiui. Pritaikę šiems dydžiams [2] formulę gauname:

$$E/T = k_2 M^3, \text{ taigi } E = k_2 M^3 \times T \qquad [3]$$

Sugretinę [1] ir [3] lygtis galime įsitikinti:

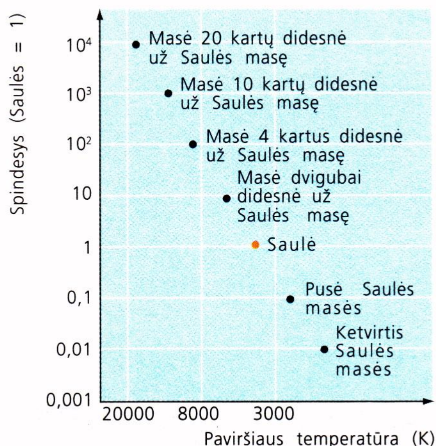
$$E = k_1 M = k_1 k_2 M^3 \times T$$

Arba šiek tiek pertvarkę šią išraišką, gauname:

$$T = K/M^2, \text{ kur K yra kita konstanta} \qquad [4]$$

Vadinasi, žvaigždės, kurios masė yra dvigubai didesnė už Saulės masę, amžius sudaro tik ketvirtadalį Saulės amžiaus. Masyviausios žvaigždės, kurių masė apie 50 kartų didesnė už Saulės, gyvuoja tik apie 1/2500-ąją Saulės amžiaus dalį. Kita vertus, žvaigždė, kurios masė lygi 1/10 Saulės masės, galėtų gyvuoti šimtą kartų ilgiau.

Dabar jau turėtų būti aišku, kodėl Paukščių Take tiek daug senų, mažų ir blyškių žvaigždžių, ir tiek mažai didelių, karštų ir ryškių. Išsami teorija, leidžianti dar tiksliau nurodyti ryšį tarp žvaigždės masės ir jos amžiaus, teigia, jog Žemės amžius yra apie 5 milijardai metų, o Visatos amžius atitinka Didžiojo Sprogimo modelį.



27.43 pav. Pagrindinės sekos žvaigždžių masės, spindesio ir temperatūros sąryšis

?

Y Patikrinkite, ar žvaigždžių, išvardytų 27.5 lentelėje, amžius yra susijęs su tekste aptartomis jų masėmis ir spindesiu moksliškai pagrįstu būdu.

Žr. 33 ir 34 klausimus. ■

Žvaigždės mirtis

Kai pagrindinės sekos žvaigždė sudegina savo pagrindinį kurą – vandenilį, jos likimas pradeda priklausyti nuo degimo metu susidariusio šerdyje slėgio ir temperatūros. Galų gale visa tai priklauso tik nuo žvaigždės masės. Panagrinėkime pirmiausia likimą tokios žvaigždės, kaip Saulė.

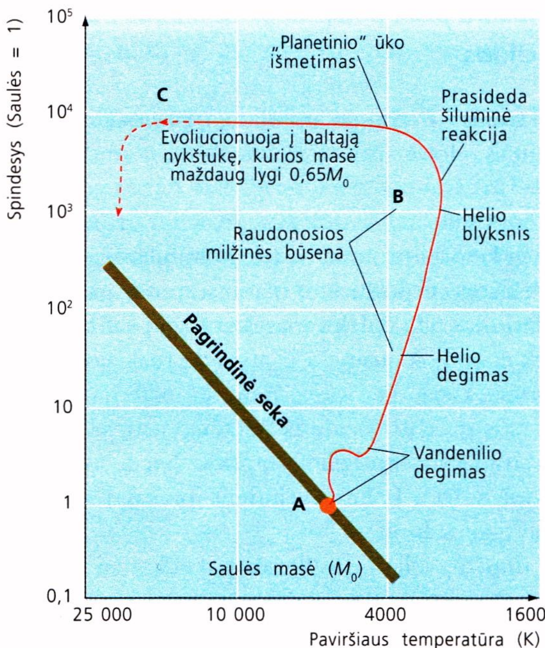
13 SAULĖS DYDŽIO ŽVAIGŽDĖS MIRTIS

Vandenilio degimas pirmiausia baigiasi šerdies centre, ir jis pradeda aušti. Apie šį centrą dar būna likę daug vandenilio, kuriame sintezės reakcijos vyksta toliau. Vėstant šerdies centrinei daliai, slėgis joje mažėja ir gravitacija vėl sustiprėja – ji vėl bando sutelkti medžiagą. Deja, jai kiek susitraukus į centrą įtraukiamas ir išorinis sluoksnis, kuriame dar vyksta vandenilio sintezės reakcijos, ir vėl nusistovi pusiausvyra.

Raudonosios milžinės susidarymas

Sintezės greitis kolapsuojančioje šerdyje išauga, todėl išspinduliuojama daug energijos, ir ji įkaitina toliau nuo centro esančius sluoksnius. Procesui pasiekus žvaigždės išorę, tai yra *konvekcijos zoną* (294 p.), žvaigždė pradeda plėstis. Tas plėtimasis yra toks spartus, kad žvaigždės paviršius, t. y. jos *fotosfera*, pradeda *aušti*. Šio proceso metu tokia žvaigždė kaip Saulė gali išplisti iki Žemės orbitos matmenų.

Fotosferos temperatūra krinta. Vietoj 6000 K, kuriuos ji turėjo vandenilio degimo metu, dabar belieka tik kokie 3000 K.Tačiau nepamirškime, kad labai padidėja jos paviršiaus plotas, ir dėl tos priežasties ji vis dar spinduliuoja labai daug energijos ir būna labai ryški – žvaigždės spindesys gali išaugti tūkstančius kartų. Tokia žvaigždė vadinama **raudonąja milžine**. Pažvelgę į H-R diagramą 27.44 pav., pamatysite, kad virsdama ja žvaigždė išeina iš pagrindinės sekos ir juda diagramoje į viršų ir šiek tiek į dešinę.

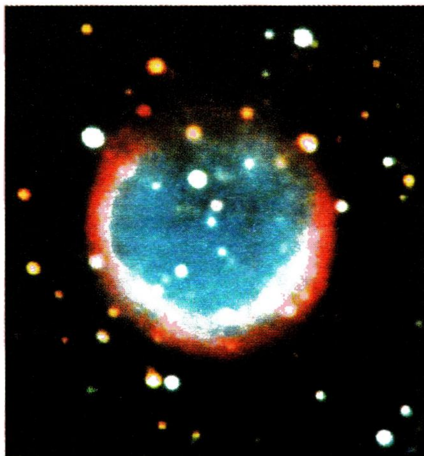


27.44 pav. **Saulės dydžio pagrindinės sekos žvaigždės evoliucijos paskutiniai etapai**

Netgi raudonosios milžinės nėra amžinos

Istorija čia nesibaigia. Žvaigždės šerdis ir toliau kolapsuoja ir tampa dar karštesnė. Be to, dėl kolapso labai padidėja jos tankis, tačiau šerdyje vandenilio jau nebelikę, ten yra tik helio atomo helis-4 branduoliai (alfa dalelės) ir elektronai.

Jeigu tokia šerdis yra pakankamai karšta, joje gali prasidėti kitas branduolinės sintezės procesas – helio virtimas anglimi. Tame procese dalyvauja **trys alfa dalelės**. Iš pradžių dvi iš jų susijungia sudarydamos berilį-8, o po to prie jų prisijungia trečioji, ir susidaro anglis-12.



27.45 pav. **Planetinis ūkas Erelio žvaigždyne. Gerai matyti dujų apvalkalas, išmestas iš mirštančios centre mėlynai apjuostos žvaigždės**

Šis naujas energijos kūrimosi procesas itin tankiose šerdyse prasideda labai greitai – per keletą minučių – ir gali sukurti pakankamai energijos įkaitinti gretimam sluoksniui, kuriame gausu helio. Tai gali sukelti smūgines reakcijas, greitai išplintančias iki žvaigždės paviršiaus ir „nupučiančias" paviršinį raudonosios milžinės sluoksnį. Tai gali trukti dešimtmečius. Žvaigždei vėl atvėsus, ji pradeda vėl trauktis, ir kas keletą tūkstančių metų šis helio degimo blyksnis gali vėl ir vėl pasikartoti. Žvaigždė tarsi pulsuoja, jos dydis ir spindesys kinta, tačiau kitimo periodai gana ilgi.

Senos raudonosios milžinės gali pavirsti planetų ūkais

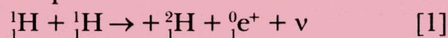
Aprašyta laiko skalė yra per ilga stebėti, bet teorija numato tolesnes proceso fazes, kurios gali būti užfiksuotos. Viena jų yra **planetinis ūkas**. Ūkas ne visai pagrįstai vadinamas planetiniu, šis terminas nusistovėjo, kai senieji stebėtojai kadaise stebėję mažais teleskopais manė, kad tai, ką jie mato, yra planetos. Šis ūkas susidaro, kai raudonoji milžinė nusimeta beveik visą apvalkalą, ir jos supertanki šerdis lieka viena ir gali būti matoma. Ji apšviečia iš vidaus šį besiplečiantį dujų apvalkalą. Galima matyti nemažai tokių objektų, vienas jų parodytas 27.45 pav.

Baltosios nykštukės

Tanki šerdis, sudaryta iš anglies atomo branduolių, nėra pakankamai karšta, kad joje prasidėtų kitos sintezės reakcijos, todėl tokios masės žvaigždė pavirsta **baltąja nykštuke**. Ilgainiui baltoji nykštukė atvėsta ir galų gale tampa **juodąja nykštuke**.

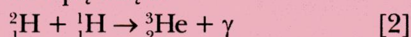
Branduolinės reakcijos žvaigždėse: protono–protono ciklas

Pirmoji reakcija, kuri vyksta karštoje ir tankioje plazmoje žvaigždės šerdyje, yra vandenilio virtimas heliu. Tai **protono–protono ciklas** (sutrumpintai p–p ciklas). Prisiminkime 27.21 pav. Ciklas prasideda, kai temperatūra pasiekia 10^7 laipsnių, bet geriausiai vyksta esant dar dešimt kartų didesnei temperatūrai. Tokioje temperatūroje protonai juda tokiais greičiais, kad susidurdami gali įveikti savo krūvių stūmos jėgą ir tiek suartėti, kad pradėtų veikti jų stiprioji branduolinė sąveika. Būtent ji ir suriša protonus, bet ne į helį, kuriam reikia keturių nukleonų, o į dviejų nukleonų branduolį – deuteroną. Deuteronas vėlgi nėra dviejų protonų sistema, nes dviejų protonų sąveika yra per silpna jiems surišti. Deuteroną, vandenilio izotopo deuterio branduolį, sudaro protonas ir neutronas, taigi šios reakcijos metu reikia dar vienam protonui virsti neutronu:



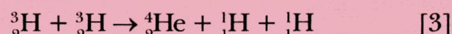
$$^1_1H + ^1_1H \rightarrow + ^2_1H + ^0_1e^+ + \nu \quad [1]$$

Deuteronui susidūrus su protonu, jis jau sudaro lengvesnįjį helio izotopą helį-3:



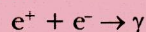
$$^2_1H + ^1_1H \rightarrow ^3_2He + \gamma \quad [2]$$

Grandinę užbaigia procesas, kai du helio-3 branduoliai susijungę sudaro helį-4, o du atliekami protonai vėl tampa laisvi:



$$^3_2H + ^3_2H \rightarrow ^4_2He + ^1_1H + ^1_1H \quad [3]$$

Teigiamoji beta dalelė (pozitronas), išspinduliuotas [1] reakcijos metu, greitai susiduria su savo antidalele – elektronu – ir abu jie anihiliuoja, pavirsdami gama kvantais – fotonais:



$$e^+ + e^- \rightarrow \gamma$$

Visa energija, išskiriama šios reakcijų grandinės metu, lygi keturių protonų ir dviejų anihiliavusių leptonų (elektrono ir pozitrono) masių sumos ir galų gale susidariusios alfa dalelės masės energijų skirtumui. Šiek tiek energijos nusineša ir atsiradę reakcijos metu neutrinai, tačiau jie nesąveikauja su materija ir beveik šviesos greičiu išlekia iš reakcijų srities. Kiekvienam susidarančiam helio-4 branduoliui ši energija sudaro $4{,}2 \times 10^{-12}$ J. Tai pagrindinis įprastųjų žvaigždžių energijos šaltinis.

Kaip minėta, vėliau, susidarius pakankamai helio, galimos dar ir trijų alfa dalelių jungimosi į anglį reakcijos (309 p.). Branduolinės sintezės reakcijos prie anglies nesustoja – toliau gali būti gaminami ir dar sunkesni branduoliai, iki geležies imtinai. Visos šios reakcijos yra *egzoterminės*, t. y. paverčiančios masę energija. Reakcijos, kurių metu galėtų susidaryti branduoliai, sunkesni už geležį, yra *endoterminės*. Joms vykstant energija virsta mase, taigi reikalinga papildoma energija, kurią gali suteikti tik karšta žvaigždės šerdis. Jų metu šerdis labai intensyviai vėsta, ir tai gali sukelti katastrofinius reiškinius.

14 ŽVAIGŽDĖS, KURIŲ MASĖ DIDESNĖ NEI SAULĖS

Paprastos nedidelės žvaigždės, tokios kaip Saulė, savo amžių baigia tikriausiai trijų alfa reakcijomis. Visam heliui pavirtus anglimi, žvaigždės temperatūra jau per žema, kad vyktų tolesnės sintezės reakcijos, o jos masė – per maža, kad pakeltų tą temperatūrą dar traukdamasi.

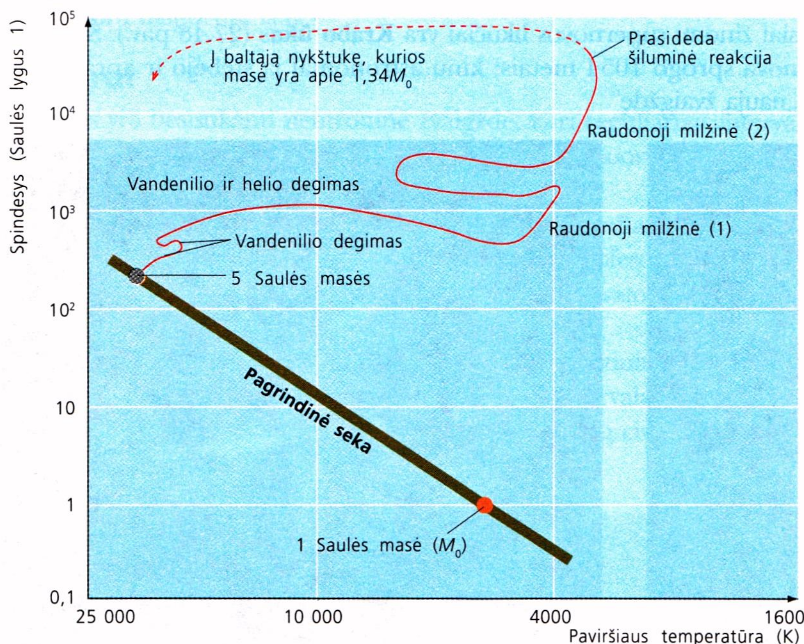
Didesnės nei Saulės masės žvaigždės savo gyvenimą dar gali pratęsti, nes jose vykstančių sintezės reakcijų metu gali susidaryti sunkesnieji branduoliai ir išsiskirti *energija*. Pavyzdžiui, anglis-12 ir helis-4 gali jungtis sudarydami deguonį-16, deguonis-16 jungdamasis su heliui-4 sudaro neoną-20 ir taip toliau. Tokia reakcijų seka yra patikrinta eksperimentiškai Žemėje ir ją patvirtina sunkesniųjų žvaigždžių atmosferų sudėtis.

Penkių Saulės masių žvaigždė

Pagrindinės sekos žvaigždė, kurios masė prilygsta penkioms Saulės masėms, yra labai ryški, ne tik didesnė už Saulę, bet ir aukštesnės temperatūros, siekiančios apie 20 000 K. Joje energija išsiskiria įprastu būdu – vandeniliui virstant heliu, bet šis procesas gali būti daug spartesnis dėl spartesnio nei mums žinomas protono–protono ciklas. Temperatūra tokios žvaigždės šerdyje yra daugiau nei dvigubai didesnė už Saulės šerdies temperatūrą ir siekia $3{,}4 \times 10^7$ K. Ji spinduliuoja 500 kartų daugiau energijos per sekundę, taigi ir pagrindinėje sekoje užtrunka daug trumpiau. Palyginti su 10 milijardų metų trukmės Saulės gyvavimo amžiumi, jos „amželis“ gerokai trumpesnis ir sudaro tik kokius 400 milijonų metų.

Sudegus vandeniliui tokia žvaigždė, panašiai kaip ir Saulė, degindama helį tampa **raudonąja milžine**.

Kaip paprastai, išsiskyrusi energija nuplėšia išorinį atmosferos sluoksnį, ir žvaigždė iš raudonosios milžinės pavirsta mažesne baltos spalvos žvaigžde. Tada ji jau tampa heline žvaigžde, nes visas jos vandenilis jau būna sudegęs. Vykstant trijų alfa dalelių procesui jai energijos gali pakakti dar kokius 10 milijonų metų.



27.46 pav. **Žvaigždės, kurios masė penkis kartus didesnė už Saulės masę, evoliucija. Panaši yra dar didesnės masės žvaigždės raida H–R diagramoje, tačiau galų gale ji gali tapti supernova, susprogti ir baigti savo amžių kaip neutroninė žvaigždė**

Penkių Saulės masių žvaigždės mirtis

Kai visas helis šerdyje virsta anglimi, energijos daugiau negaminama. Tada žvaigždė vėl susitraukia. Galimi du scenarijai to, kas vėliau gali įvykti.

Išsigimusi juodoji nykštukė...

Pagal pirmąjį scenarijų žvaigždė toliau netenka masės (žvaigždžių vėjas ir pan.) ir tyliai virsta baltąja nykštuke, sudaryta vien iš anglies; jos masė nuo 1,3 iki 1,5 Saulės masių. Tokios masės žvaigždės šerdyje dalelės išsidėsčiusios tokiu tankiu, kad gravitacijos jėgos neįstengia jos daugiau sutraukti. Sakoma, kad tokios būsenos materija yra išsigimusi. Gravitacija neveikia, energija nedidėja, žvaigždė palaipsniui vėsta ir galų gale tampa **juodąja nykštuke**.

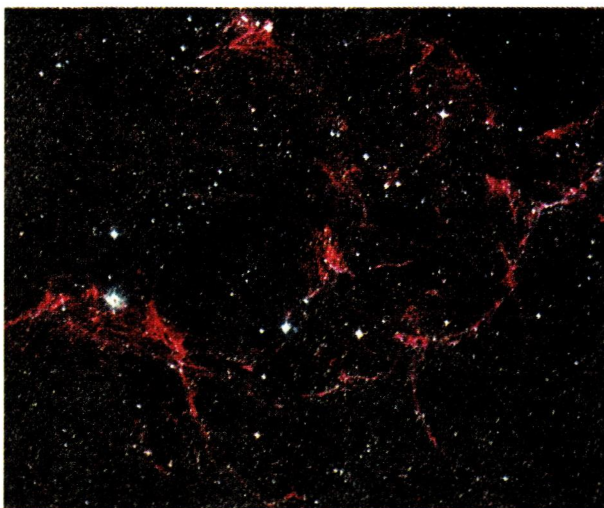
...ar supernova?

Alternatyvus scenarijus – kai išoriniai sluoksniai lieka neišsigimę. Tada žvaigždė vėl gali sukaupti energijos dėl gravitacijos, ir anglies šerdyje gali prasidėti naujos sintezės reakcijos. Kadangi tokios žvaigždės šerdį sudaro kietos būsenos anglis, kur branduoliai ir elektronai glaudžiai susispietę, anglies degimo reakcija prasideda iš karto visoje šerdyje, kurios masė yra apie 1,4 Saulės masių. Visa sukaupta energija išsiskiria per keletą milisekundžių. *Energijos spinduliavimo greitis tų reakcijų metu yra neįsivaizduojamai didelis – žvaigždė spinduliuoja panašiai kaip galaktika, sudaryta iš dešimčių milijardų žvaigždžių*. Danguje įsižiebia nauja labai ryški žvaigždė, vadinamoji **supernova**. Astronomai ją vadina **I tipo** supernova.

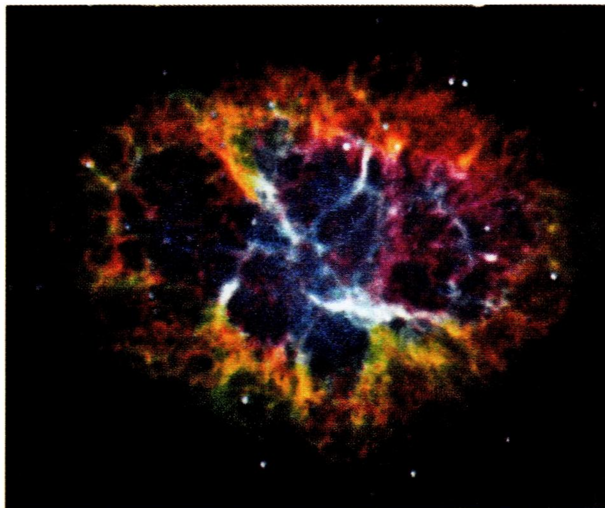
Visi išoriniai tokios žvaigždės sluoksniai nupučiami baisiu greičiu, siekiančiu iki 10^7 m/s. Supernova sušvinta per kokias 40 dienų, kai nulėkusi karštoji medžiaga išsiplečia iki matmenų, artimų Saulės sistemos matmenims.

27.47 pav. parodyta, kas tai yra supernovos likučiai. Raudonai švyti sritys, kuriose tų likučių dalelės susiduria su mažo tankio dujomis (daugiausia vandeniliu), užpildančiomis tarpžvaigždinę erdvę.

Paprastai vidutinėje galaktikoje supernova sušvinta kas 50 metų. Taigi Saulės sistemos aplinkoje toks įvykis retas, ir dabar modernioji technika parengta, jei tik jis įvyktų, viską kruopščiai užregistruoti. Geriausiai žinomi supernovos likučiai yra **Krabo ūkas** (27.48 pav.). Ši supernova sprogo 1054 metais; kinų astronomai ją stebėjo ir aprašė kaip „naują žvaigždę“.



27.47 pav. **Kairėje: Vela supernovos, žvaigždės, sprogusios prieš 12 000 metų, likučiai**



27.48 pav. **Dešinėje: Krabo ūkas. Dujos, plintančios nuo žvaigždės, yra žalios, geltonos ir raudonos spalvos. Mėlynas švytėjimas yra sukeltas energingų elektronų, besisukančių žvaigždės likučių, iš kurių susidaro pulsaras – besisukanti neutroninė žvaigždė, magnetiniame lauke. (Šio ūko skersmuo apie 10 šviesmečių, jis nutolęs nuo Žemės per 7000 šviesmečių)**

Labai didelė žvaigždė tampa neutronine žvaigžde

Žvaigždė, kurios masė prilygsta maždaug 8 Saulės masėms arba net didesnė, geba „užsiauginti“ gana karštą šerdį, kurioje anglis ima degti, bet nesprogsta. Vykstant branduolinės sintezės reakcijoms auga vis didesni ir didesni branduoliai iki geležies imtinai; tai jau paskutinis (didžiausias) branduolys, kurį sintetinant *išsiskiria* energija. Aplink šią geležinę šerdį esančiuose sluoksniuose, priklausomai nuo jų temperatūros, vyksta vienokios ar kitokios sintezės reakcijos, kurių metu gaminami įvairūs branduoliai, kuriuos tik galima sintetinti esant tai temperatūrai, žr. 27.49 pav.

Akivaizdu, kad ilgainiui, kai šerdyje susikaupia labai daug geležies, ir daugiau energijos susikurti negali, veikiama savo didelės gravitacijos jėgos, ji pradeda trauktis. Šerdis vėl pradeda kaisti ir kai temperatūra pasiekia maždaug 5 milijardus Kelvino laipsnių, fizikos dėsniai suveikia netikėtu būdu.

Žvaigždės išoriniai sluoksniai ir netgi jos šerdis yra veikiami *radiacinio slėgio*, kurį sukelia karštosios plazmos fotonai. Kai temperatūra pasiekia minėtus 5 milijardus Kelvinų, tie fotonai įgyja energiją, pakankamą suskaldyti geležies branduolius į helio branduolius. Kadangi šiam procesui reikia daug energijos, kurią turi tie fotonai, jų sukeliamas radiacinis slėgis staiga krinta, ir įvyksta labai greitas gravitacinis kolapsas.

Išoriniai sluoksniai sugriūva į šerdį, kuri dar turi daug geležies. Maždaug tokių matmenų kaip Žemė šerdis staiga susitraukia į kokių 50 km spindulio sferą. Joje medžiaga yra tankesnė nei atomų branduoliuose. Esant tokiam tankiui helio branduolių protonai ir elektronai, išspinduliuodami neutrinus, jungiasi į neutronus.

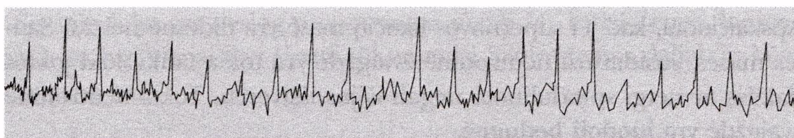
Didžioji dalis žvaigždę sudarančios medžiagos, kurioje dar vyksta įvairiausios sintezės reakcijos, taip pat traukiasi. Vykstant šiems procesams, sluoksnių temperatūra auga, nes jie suartėdami praranda potencinę gravitacinę energiją. Taigi kylant temperatūrai, staiga išauga ir sintezės reakcijų greitis. Įvyksta tarsi sprogimas, ir išoriniai sluoksniai sukrinta į šerdį, sudarytą iš neutronų (27.50 pav.), vėl atšoka ir sukelia smūginę bangą, kuri dideliu greičiu „nupučia“ išorinius sluoksnius. Vėl įvyksta supernovos sprogimas, vadinamas **II tipo supernova**. Centre lieka karšta supertanki šerdis, vadinamoji **neutroninė žvaigždė**, turinti labai stiprų magnetinį lauką.

Pulsarai

Pulsaras yra besisukanti neutroninė žvaigždė, kuri reguliariais intervalais spinduliuoja trumpus radijo bangų spinduliuotės šuorus (žr. 27.48 ir 27.52 pav.).

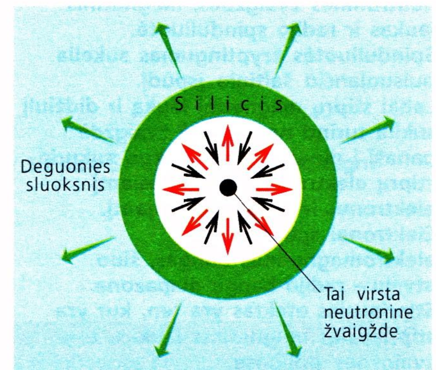
Pirmieji pulsarai buvo atrasti 1967 m. 22 metų amžiaus studentės – eksperimentuotojos J. Bell *(Jocelyn Bell-Burnell)* ir profesoriaus A. Hjuišo *(Anthony Hewish)* Mulardo radioastronomijos observatorijoje Kembridže, Anglijoje.

J. Bell aptiko, kad vienas stebimų radijo bangų šaltinių spinduliuoja trumpus impulsus, pasikartojančius reguliariais intervalais, beveik kas sekundę. Pirmas įspūdis buvo toks – tai nežemiškųjų civilizacijų siunčiami signalai.

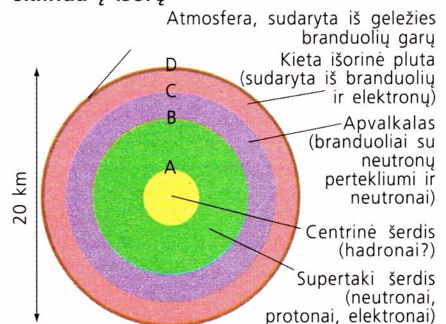


Vandenilis
Anglis ir deguonis
Helis
Deguonis
Silicis
Geležis

27.49 pav. **Pasenus labai masyviai žvaigždei, įvairiuose jos sluoksniuose gali vykti įvairiausios branduolinės sintezės reakcijos. Kai geležies šerdyje pasiekiama labai didelė kritinė temperatūra, jos branduoliai suyra ir tampa helio branduoliais. Šerdis po to atvėsta, susitraukia ir sprogsta kaip supernova**



27.50 pav. **Masyvios žvaigždės šerdis, sudaryta iš neutronų, susitraukia, ir supančios ją sritys, kuriose dar vyksta branduolinės sintezės reakcijos, „krinta“ į ją, o atsispindėjusios vėl sklinda į išorę**



Taškas	Atstumas nuo centro (km)	Tankis (kg · m^{-3})
A	1	7×10^{17}
B	7	$2{,}4 \times 10^{17}$
C	9	4×10^{14}
D	10	7×10^{9}

Masė beveik prilygsta trims Saulės masėms

27.51 pav. **Neutrononės žvaigždės struktūra. Modelis pagrįstas gravitacijos ir atomo branduolio teorijomis**

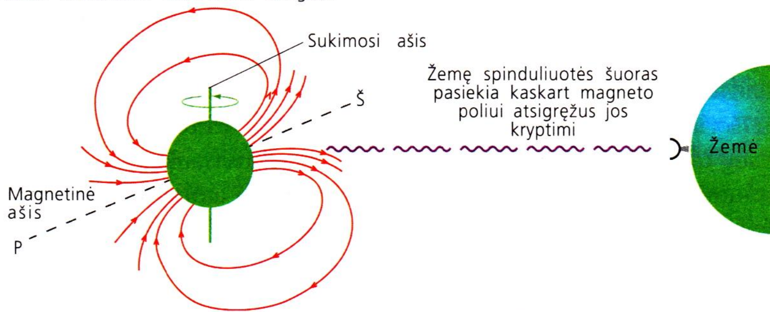
27.52 pav. **Pulsaro CPO 328 signalai, užregistruoti Prancūzijoje, Nansio radioteleskopu. Impulsai trunka 7 milisekundes ir seka intervalais, lygiais tiksliai 0,714518603 sekundės**

Vėlesni eksperimentai parodė, kad panašūs signalai sklinda ir iš kai kurių kitų šaltinių. Tapo aišku, kad tai kažkokio naujo astronominio objekto – pulsuojančios radijo žvaigždės, arba **pulsaro**, siunčiami signalai. Už šį tyrimą profesorius Hjuišas1974 m. buvo apdovanotas Nobelio premija.

Pulsarų kilmę ištyrė Tomas Goldas (Austrija ir JAV). Jau 1968 m. jis suprato, kad tai gali būti besisukančios neutroninės žvaigždės. Neutroninė žvaigždė su savo stipriu magnetiniu lauku yra susidariusi iš daug didesnės orbita skriejusios žvaigždės. Dėl judesio kiekio momento tvermės dėsnio jis yra likęs žvaigždei, todėl ji nepaprastai greitai sukasi. Besisukantis magnetinis laukas nuolatos spinduliuoja radijo bangas, bet stipriausios jos yra išilgai didžiausios lauko linijų koncentracijos krypties (27.53 pav.).

Sukantis neutroninei žvaigždei kaskart jai savo magnetiniu poliumi pasisukus link Žemės teleskopus pasiekia jos radijo signalas. Radijo signalas yra *kryptingas*, todėl ir pasikartoja reguliariais intervalais.

Pulsaras: besisukanti neutroninė žvaigždė



27.53 pav. **Pulsaro, t. y. besisukančios neutroninės žvaigždės, magnetinis laukas ir radijo spinduliuotė. Spinduliuotės kryptingumas sukelia pulsuojančio šaltinio įspūdį. Labai stiprų magnetinį lauką ir didžiulį sukinį turinti neutroninė žvaigždė panaši į dinamo mašiną, kuri sukuria stiprų elektrinį lauką, atplėšiantį elektronus ir juos pagreitinantį. Elektronai spinduliuoja elektromagnetines bangas, šiuo atveju – radijo bangų diapazone. Stipriausias efektas yra ten, kur yra stipriausias magnetinis laukas, t. y. žvaigždės poliuose**

Krabo pulsaro signalas (27.48 pav.) pasiekia Žemę kas 0,033 sekundės, o tai reiškia, kad šis pulsaras per sekundę apsisuka 30 kartų. Jis spinduliuoja platų spektrą – nuo radijo iki rentgeno spindulių, ir visa jo spinduliavimo galia sudaro apie 10^{28} W. Tai 100 kartų daugiau, nei visos Saulės spinduliuotės galia. Žemę taip pat pasiekia ir nepulsuojanti žvaigždės spinduliuotė, kuri drauge su siunčiamais impulsais siekia 10^{31} W galią, t. y. 10 000 kartų stipresnę nei Saulės.

Žr. 35 ir 36 klausimus. ■

Supernovos ir branduolių sintezė

Tokie elementai, kaip nikelis, varis, auksas, alavas, platina, švinas, uranas ar toris, taip pat visų kitų, kurių branduoliai yra sunkesni už geležies branduolį, yra susidarę tik sprogus II tipo supernovai. Kai jos šerdis susitraukia ir išskiria neutronus, nemažai jų išsilaksto į visas puses, taip pat ir į sluoksnius, supančius šerdį, kuriuose jau yra susidarę įvairūs sunkesnieji branduoliai. Neutronai, patekę į šiuos branduolius, paverčia juos vis sunkesnių ir sunkesnių elementų radioaktyviais branduoliais, kurie po beta skilimų pavirsta stabilių elementų branduoliais.

Iš dujų debesies, išmesto po supernovos sprogimo, vėliau susidaro naujos žvaigždės ir planetos. Taigi, išskyrus vandenilį, visi kiti jūsų kūne esantys elementai yra susidarę augant, mirštant arba sprogstant įvairioms žvaigždėms.

Juodosios bedugnės

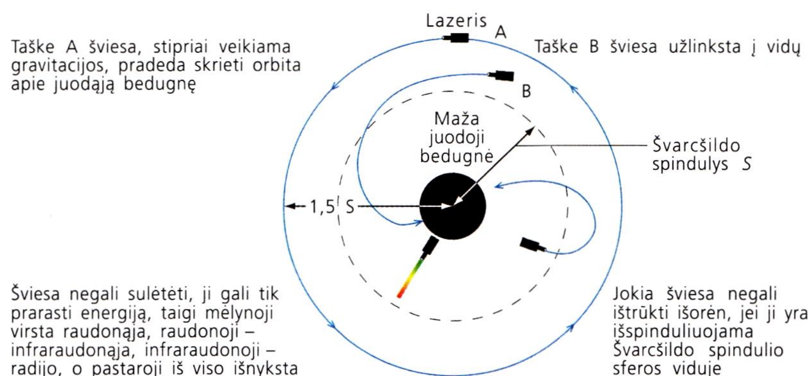
Apskaičiuota, kad jei supernovos likučių masė yra didesnė nei 2,5 Saulės masės, susidariusi neutroninė žvaigždė yra tokia tanki, kad jokios dalelės ar netgi spinduliuotė negali iš jos išsiveržti. Tokia neutroninė žvaigždė yra **juodoji bedugnė**.

Elektromagnetinė spinduliuotė yra tam tikra energijos forma, ir ji, kaip teigia reliatyvumo teorija, turi turėti ir atitinkamą masę, nusakomą Einšteino formule $E = m \times c^2$. Fotonas, kurio energija yra E (arba hf), turi masę, lygią

$$M = E/c^2 = hf/c^2$$

Neutroninės žvaigždės gravitacinis laukas veikia būtent šią efektinę masę. Jo poveikis sklindančiai į išorę šviesai negali būti palyginamas su atitinkamu poveikiu įprastinei masei, kurios *greitis turi sumažėti*, nes šviesa juda tik šviesos greičiu ir jokiu kitokiu judėti negali. Tačiau fotonas turi tam tikrą energiją, ir judant tokiame gravitaciniame lauke ji gali mažėti net iki nulio. Kitaip šis reiškinys gali būti paaiškintas remiantis *išsilaisvinimo greičio* sąvoka (1-os d. 66 p.). Jei trūkimo iš žvaigždės paviršiaus greitis yra didesnis už šviesos greitį, tai ji yra juodoji bedugnė.

Pirmasis juodųjų bedugnių savybes išnagrinėjo Karlas Švarcšildas (*Karl Schwarzschild*, Vokietija, 1873–1916). Kad objektas būtų juodoji bedugnė, jis turi būti ir pakankamai masyvus, ir gana mažas. Didžiausias spindulys, kurį gali turėti masės M objektas, kad dar išliktų juodąja bedugne, vadinamas *Švarcšildo spinduliu*. Norint patenkinti šias sąlygas, materija turi būti taip suspausta, kad jos tankis būtų daug didesnis net už neutroninės žvaigždės tankį.



27.54 pav. **Šviesa ir juodoji bedugnė**

?
Z Iš juodosios bedugnės „ištrūkimo" greitis turi būti didesnis už šviesos greitį. Aprašykite, kas atsitiks fotonui, išspinduliuotam tokios žvaigždės viduje išilgai spindulio, turėdami galvoje, kad šviesa sulėtėti negali.

Kokio dydžio būtų Saulė, jei ji taptų juodąja bedugne?

Išsilaisvinimo iš masės M sferos greitis lygus:

$$v = \sqrt{\frac{2GM}{r}}$$

kur r yra jos spindulys, o G – universalioji gravitacinė konstanta, lygi $6{,}67 \times 10^{-11}$ N m^2 kg^{-2} (arba m^3 kg^{-1} s^{-2}) (žr. 1-os d. 47 p.). Taigi įrašę į formulę šviesos greitį (3×10^8 m · s^{-1}) ir Saulės masę (2×10^{30} kg), galime rasti Saulės Švarcšildo spindulį:

$$\begin{aligned} r &= 2GM/c^2 \\ &= \frac{2\times 6{,}67\times 10^{-11}\times 2\times 10^{30}}{9\times 10^{16}}\,\text{m} \\ &= 3000\,\text{m} \end{aligned}$$

Šis spindulys yra tiesiog proporcingas masei M. Todėl Žemei, kurios masė yra lygi vienai trys šimtai tūkstantajai Saulės masės daliai, jis būtų lygus 1 cm!

■ Žr. 37 klausimą.

Įvykių horizonto pakraštyje

Materija juodojoje bedugnėje turi būti tokia tanki, kad jos spindulys būtų mažesnis už Švarcšildo spindulį. Ši didžiausia M masės objekto spindulio vertė, kad jis dar išliktų juodąja bedugne, vadinama **įvykių horizontu**. Niekas negali ištrūkti iš taško šiapus horizonto.

Juodųjų bedugnių aptikimas

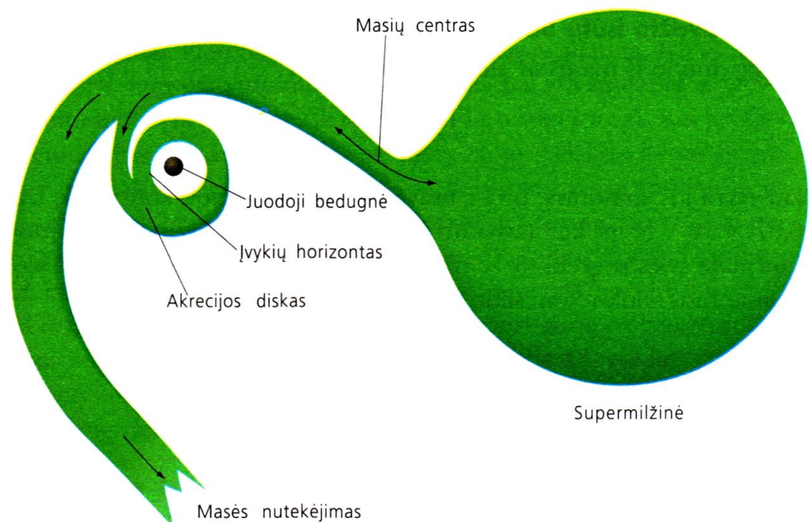
Jokia materija ir netgi spinduliuotė negali ištrūkti iš juodosios bedugnės, taigi – kaipgi ją įmanoma aptikti?

Įsivaizduokite, kas vyksta, kai kokia nors medžiaga, tarkime, dujos ar dulkės, krinta į juodąją bedugnę. Jai artėjant prie bedugnės, greitis turi vis labiau augti. Dalelės, judėdamos tokiu dideliu greičiu, aktyviai susidūrinėja, ir spinduliuojami labai didelio intensyvumo, kryptingi ir poliarizuoti elektromagnetiniai spinduliai, vadinami *sinchrotronine spinduliuote*.

Greitosios dalelės, esančios prie pat įvykių horizonto, spinduliuoja didžiausios energijos, t. y. rentgeno, spindulius. Taigi juodąją bedugnę galima aptikti tik ten, kur stebimi intensyvūs tokios spinduliuotės šaltiniai.

Dauguma žvaigždžių yra dvinarės. Jos abi sukasi apie bendrą masių centrą. Dažnai pasitaiko, kad viena žvaigždžių yra didelė, masyvi ir ryški, o jos draugė yra per blyški, kad būtų pastebėta. Gulbės žvaigždyne yra žvaigždė, vadinama Gulbės X-1, kuri apsisuka apie nematomą savo draugę kas 5,6 paros. Šis periodas išmatuotas pagal žvaigždės Doplerio poslinkio periodą. Ši žvaigždė labai šviesi. Ji turėtų būti labai karšta supermilžinė, kurios masė mažiausiai 15 kartų didesnė už Saulės masę, o paviršiaus temperatūra daugiau nei 30 000 K. Kad tokios masės žvaigždė galėtų taip greitai judėti orbitoje, jos nematomoji draugė turi būti taip pat labai masyvi. Aišku, kad tai gali būti tik itin didelė mirusi žvaigždė, kokia ir galėjo pavirsti juodąja bedugne.

Kitas įrodymas būtų tas, kad, be įprasto didelei karštai žvaigždei spinduliavimo, Gulbė X-1 skleidžia labai daug rentgeno spindulių. Šios spinduliuotės galia siekia 4×10^{30} W, o tai 10 000 kartų daugiau už Saulės spinduliuotės galią.



27.55 pav. **Rentgeno žvaigždės modelis kaip dvinarės, kurios vienas narys yra juodoji bedugnė. Materija nuo supermilžinės nuplėšiama veikiant juodosios bedugnės gravitaciniam laukui. Kai ji susiploja į akrecijos diską, jos temperatūra būna pasiekusi 10^6 K, o tai reiškia, kad ji gali spinduliuoti rentgeno spindulius**

Paaiškinti šiuos reiškinius galima modeliu, pateiktu 27.55 pav. Jei supermilžinė yra netoli nuo juodosios bedugnės, tai jos medžiagą pastaroji siurbia ir aplink susidaro diskas. Dalis medžiagos iš disko pakliūva į

juodąją bedugnę, o dalis, nepajėgianti išsilaikyti diske, nulekia į išorę. Dalelių greitis šiame sraute yra toks didelis, kad jos jonizuojasi ir skleidžia intensyvius rentgeno spindulius.

14 TOLIMOJI VISATA

Šiame skyriuje išnagrinėjome žvaigždžių ir vienintelės gerai žinomos planetų sistemos – Saulės sistemos – savybes. Pastaruoju metu randama vis daugiau ir daugiau planetų sistemų, apimančių nelabai nutolusias žvaigždes.

Dėl jau nurodytų priežasčių astronomams stebėti palankios tik pačios artimiausiosios žvaigždės. Tuo tarpu vien tik mūsų galaktikoje, Paukščių Take, jų yra šimtai milijardų, pati galaktika yra apie 100 000 šviesmečių dydžio. Stebimoje Visatos dalyje jau aptikti milijonai, o gal ir milijardai kitų galaktikų.

Kas tai yra galaktika, kokie dar objektai egzistuoja kosmose ir kas gali būti už stebimos Visatos dalies ribų, paaiškinsime kitame skyriuje, kur aptarsime dar didesnius nei šiame laikus, energijas ir atstumus.

SANTRAUKA

Išnagrinėję šio skyriaus medžiagą, jūs galėjote:

- Sužinoti svarbiausias Saulės planetų sistemos savybes.
- Sužinoti, kad planetų judėjimą aprašo trys Keplerio dėsniai ir suprasti, kaip jie susiję su Niutono gravitacijos teorija ir judėjimo lygtimis.
- Sužinoti apie šiuolaikinį Saulės modelį, jos energijos šaltinį ir Saulės bei planetų susidarymą dėl gravitacijos veikimo traukiantis dideliam dujų ir dulkių debesiui.
- Suprasti vidinės ir išorinės planetų grupių prigimtį ir susidarymo ypatumus, taip pat susipažinti su šių grupių skirtumais.
- Suprasti kometų ir meteoritų kilmę ir sandarą.
- Sužinoti, kaip gaunama informacija apie Saulę, stebint jos spinduliuotę.
- Sužinoti pagrindinius atstumų matavimo vienetus – astronominį vienetą, parseką ir šviesmetį.
- Sužinoti, kaip galima nustatyti žvaigždės masę, temperatūrą bei jos skleidžiamą energiją (spindesį) išmatavus atstumą iki jos ir patyrinėjus jos spektrą.
- Suprasti, kaip dvinarės žvaigždės naudojamos žvaigždžių masėms nustatyti ir taip susieti įvairių žvaigždžių mases ir spindesius.
- Sužinoti, kaip žvaigždės klasifikuojamos pagal jų spektrus ir kaip ši klasifikacija susijusi su jų paviršiaus temperatūra ir spindesiu Hercšprungo ir Raselo (H-R) diagramoje.
- Sužinoti, kaip žvaigždės klasifikuojamos pagal regimąjį ir absoliutųjį ryškius.
- Suprasti skirtingos masės žvaigždžių susidarymo ir raidos dėsningumus ir suvokti tokių objektų ir reiškinių, kaip raudonosios milžinės, baltosios nykštukės, planetiniai ūkai, supernovų sprogimai, neutroninės žvaigždės, pulsarai ir juodosios bedugnės, prigimtį.

KLAUSIMAI

Saulės sistema ir Saulė kaip žvaigždė

1 Paaiškinkite tokių sąvokų prasmę: **a)** Oorto debesys, **b)** palydovas, **c)** planetesimalė, **d)** parsekas, **e)** šviesmetis.

2 Paaiškinkite (be matematinių išvedžiojimų), kodėl planetos, esančios toliau nuo Saulės, skrieja savo orbitomis lėčiau negu artimesnės Saulei planetos.

3 Paaiškinkite *paralakso* sąvokos prasmę. Kaip išmatavus paralaksą galima rasti atstumą iki objekto, kurio negalima pasiekti, tokio kaip žvaigždė ar laivas jūroje?

4 Naudodamiesi planetų duomenimis, pateiktais 27.1 lentelėje (282 p.), atsakykite į tokius klausimus:

a) **(i)** Apskaičiuokite Marso judėjimo orbita greitį.
(ii) Patikrinkite trečiąjį Keplerio dėsnį Merkurijui ir Marsui.

b) Naudodamiesi orbitinio greičio verte, rasta sprendžiant **a) (i)**, raskite Saulės masę.

$(v = \sqrt{\dfrac{GM}{r}}$; imkite $G = 6,67 \times 11^{-11}\ \mathrm{m^3 \cdot kg^{-1} \cdot s^{-2}})$.

5 Saulės sistemos planetos skirstomos į dvi pagrindines grupes. **a)** Aprašykite pagrindinius skirtumus tarp šių grupių planetų. **b)** Pagalvokite, kaip susidarant Saulės sistemai galėjo atsirasti šie skirtumai.

6 Lentelėje pateikti kai kurie keturių didžiausiųjų Jupiterio palydovų duomenys.

Palydovas	Atstumas nuo Jupiterio (10^3 km)	Orbitinis periodas (paros)
Ija	422	1,8
Europa	671	3,6
Ganimedas	1070	
Kalista	1880	

27.K6 lentelė

a) Papildykite lentelę Ganimedo ir Kalistos orbitiniais periodais. (Pasinaudokite trečiuoju Keplerio dėsniu).

b) Įrodykite, kad Jupiterio masė lygi $1,90 \times 10^{27}$ kg. (Imkite, kad $G = 6,67 \times 10^{-11}\ \mathrm{m^3 \cdot kg^{-1} \cdot s^{-2}}$)

7 Kaip Saulės sistemos susidarymo modelis paaiškina: **a)** kad sferinis dujų debesis gali pavirsti suplotu disku, **b)** kodėl šis diskas sukasi?

8 Aprašykite, kaip galima stebėjimais patvirtinti teorijos išvadas, kad žvaigždės susidaro iš dujų ir dulkių debesies, kuris traukiasi ir tuo pačiu metu kaista.

9 Paaiškinkite, kodėl dauguma žvaigždžių gimsta mažomis grupėmis, kuriose jos yra vienodo amžiaus ir gana arti viena kitos išsidėsčiusios. (Atminkite, kad šios grupės *nėra* žvaigždynai.)

10 Paaiškinkite, kaip žvaigždės spektras gali informuoti apie: **a)** jos paviršiaus temperatūrą, **b)** elementus, esančius jos atmosferoje, **c)** jos judėjimo Žemės atžvilgiu greitį.

11 **a)** Trumpai aprašykite, kas tai yra **(i)** plazma, **(ii)** branduolinė sintezė.
b) Kaip branduolinė sintezė gali būti energijos šaltiniu? Kaip ši energija gali *įkaitinti* Saulės centrą?

12

a) **(i)** Kokie yra trys pagrindiniai helio gamybos iš vandenilio žvaigždės, tokios kaip Saulė, viduje etapai?
(ii) Kodėl šių procesų metu gaminama energija?

b) galutinis sintezės reakcijų Saulėje (*protono-protono ciklo*) rezultatas gali būti pateiktas taip:

$$4\,^1\mathrm{H} \rightarrow {}^4\mathrm{He} + 2e^+ + 2\nu + 2\gamma + 24{,}68\ \mathrm{MeV}.$$

(i) Paaiškinkite kiekvieno simbolio šioje reakcijoje prasmę.
(ii) Apskaičiuokite energiją, atsirandančią šio proceso metu, ir išreikškite ją džauliais. (Elektrono krūvis = $1,60 \times 10^{-19}$ C).

13 Trumpai aprašykite, kaip energija, išsiskyrusi Saulės šerdyje, pasiekia jos paviršių, kad toliau galėtų plisti kaip spinduliuotė.

14 Paaiškinkite šių sąvokų prasmę: **a)** fotosfera, **b)** konvekcijos zona, **c)** vainikas, **d)** Fraunhoferio linija.

15 **a)** Kas tai yra teleskopo *apertūra*? **b)** Pateikite dvi priežastis, dėl ko teleskopas yra tuo geresnis, kuo didesnė jo apertūra.

16 Kas tai yra teleskopo *didinimas*? Kas jį apibūdina?

17 Kodėl radioteleskopo lėkštė turi būti daug didesnė už optinio teleskopo objektyvą?

18

a) Palyginkite skiriamąją gebą **(i)** radioteleskopo, kurio lėkštės skersmuo lygus 50 m, naudojamo registruoti 150 MHz dažnio spinduliuotę, **(ii)** optinio teleskopo, kurio veidrodžio skersmuo lygus 4 m.

b) Paaiškinkite, kodėl sunku naudojant tokius teleskopus aptikti radijo bangų šaltinį, kuris spinduliuoja kartu ir optiniame diapazone, tokį kaip žvaigždė ar galaktika.

19 Nurodykite dvi priežastis, kodėl kosmose esantis teleskopas, toks kaip Hablo, gali gauti iš astronominių objektų geresnės kokybės informaciją, nei antžeminiai teleskopai.

20 Aprašykite ir paaiškinkite veikimą žinomos jums įrangos, leidžiančios pagerinti vaizdo, gaunamo Žemėje esančiu teleskopu, kokybę. (Čia neturi būti nieko bendra su lėkštės ar imtuvo skersmens didinimu).

21 Aprašykite savitus sunkumus, kylančius astronomams, bandantiems tirti astronominius objektus **a)** rentgeno spindulių, **b)** ultravioletinių spindulių, **c)** infraraudonųjų spindulių diapazonuose.

22 Stebint žvaigždę Kentauro Alfa iš Žemės su pusės metų intervalu pasirodo, kad tolimų žvaigždžių atžvilgiu jos padėtis pasikeitė 0,750 kampinių sekundžių. Apskaičiuokite šios žvaigždės atstumą nuo Žemės **a)** parsekais, **b)** šviesmečiais.

23 Išmatuotos šitokios žvaigždės charakteristikos:
A. bangos ilgis, kuriam jos spinduliuotės intensyvumas yra didžiausias.
B. jos atstumas nuo Žemės.
C. visa spinduliavimo energija, per sekundę krintanti į Žemės paviršiaus ploto vienetą. Paaiškinkite, kaip, naudodamiesi šiais rezultatais, galite įvertinti: **a)** tos žvaigždės paviršiaus temperatūrą, **b)** jos spindesį.

24 Dvinarė sistema sudaryta iš žvaigždžių, kurių masės lygios 3 ir 8 Saulės masėms, o atstumas tarp jų yra 120 AU. **a)** Kaip toli nuo didžiosios žvaigždės centro nutolęs sistemos masių centras? **b)** Koks mažesniosios žvaigždės apsisukimo apie bendrą masių centrą periodas (išreikštas Žemės metais)?

25 Paaiškinkite, kas tai yra: **a)** užtemdančios viena kitą, **b)** spektroskopinės dvinarės žvaigždės.

26 Paaiškinkite, kaip dvinarės žvaigždžių sistemos spektrografinių matavimų duomenys gali būti panaudoti apskaičiuoti jų **a)** regimuosius orbitinius greičius, **b)** jų orbitinius periodus.

27 Paaiškinkite skirtumą tarp *regimojo* ir *absoliučiojo* žvaigždės ryškių.

28 Žvaigždės Spikos regimasis ryškis lygus +1. Kartais naktį Marso planetos regimasis ryškis lygus +2. **a)** Kuris objektas atrodo šviesesnis? **b)** Kiek kartų šviesesnis?

29 Sąryšis tarp žvaigždės regimojo ryškio m ir jos absoliučiojo ryškio M yra toks: $M = m + 5 - 5 \log D$, kur

Žvaigždė	Atstumas (pc)	Regimasis ryškis
Tikutis	13	0,08
Rygelis	430	0,12
Proksinas	3,4	0,38

27.K29 lentelė

D yra žvaigždės atstumas nuo Žemės, išreikštas parsekais. Apskaičiuokite tokių žvaigždžių absoliučiuosius ryškius:

30 Paaiškinkite tokių sąvokų prasmę: **a)** spektrinė klasė, **b)** spindesys, **c)** Hercšprungo ir Raselo diagrama.

31 Ką H-R diagramoje reiškia: **a)** pagrindinė seka, **b)** baltoji nykštukė, **c)** milžinė?

32 Paaiškinkite, kaip yra susiję: **a)** žvaigždės spektrinė klasė ir jos paviršiaus temperatūra, **b)** žvaigždės spindesys ir jos masė.

33 Kodėl didelės masės žvaigždės daugiausia labai karštos ir trumpai gyvuoja?

34 Palyginkite dviejų žvaigždžių, vienos tokios kaip Saulė, o kitos – penkis kartus masyvesnės, evoliuciją. Pailiustruokite savo atsakymą jų raidos pėdsakais H-R diagramoje.

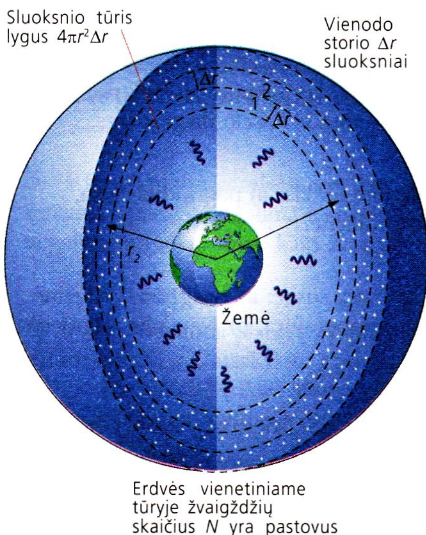
35 Panašu, kad pulsarai yra greitai besisukančios neutroninės žvaigždės. Kokių turime to įrodymų?

36 Pirmą kartą stebint pulsarą nustatyta, kad jo pulsacijų dažnis yra 0,200 000 pulsacijos per sekundę, o energijos spinduliavimo greitis lygus $5{,}00 \times 10^{30}$ W. **a)** Apskaičiuokite, kiek šis pulsaras atlieka: **(i)** apsisukimų per sekundę **(ii)** radianų per sekundę. **b)** Po ketverių metų ($1{,}26230 \times 10^8$ s) stebėjimų buvo nustatyta, kad pulsacijų dažnis sumažėjo iki 0,199 800 pulsacijų per sekundę. **(i)** Kiek energijos pulsaras prarado per tuos ketverius metus? **(ii)** Raskite jo pakitusį kampinį greitį radianais per sekundę. **c)** Tarkime, pulsaro prarastą dėl spinduliavimo energiją kompensavo jo sukimosi kinetinės energijos sumažėjimas. Besisukančio kūno kinetinė energija lygi $E_K = 1/2\, I\omega^2$, kur ω yra jo kampinis greitis, o I – jo inercijos momentas, t. y. konstanta, priklausanti nuo kūno masės, jo formos ir dydžio. Nustatykite I reikšmę. **d)** paprasčiausias besisukančios neutroninės žvaigždės modelis grindžiamas nuostata, kad jos spindulys yra nuo 10 iki 20 km, o tankis visur vienodas. Mūsų neutroninės žvaigždės spindulys yra 15 km, o masės m ir spindulio r sferos inercijos momentas lygus $0{,}2\, Mr^2$. Įvertinkite tos neutroninės žvaigždės masę.

37 Aprašykite ir paaiškinkite, kas atsitinka su šviesos pluošteliu, kurį išspinduliuoja koks nors šaltinis, esantis juodojoje bedugnėje.

27 ir 28 skyriaus schemą rasite 335 puslapyje

28 Kosmologija



Sferinio sluoksnio, kurio centras yra Žemė, tūris lygus $4\pi r^2 \Delta r$

Žvaigždžių, esančių kiekviename sluoksnyje, skaičius proporcingas r^2

Tarkime, kiekviename vienetiniame tūryje bet kur erdvėje žvaigždžių įvairovė yra tokia pat; tokiu atveju šviesa, kurią išspinduliuoja sluoksnyje esančios žvaigždės, taip pat proporcinga r^2

Šviesa sklinda pagal atvirkštinio kvadrato dėsnį, todėl toldama nuo šaltinio ji silpnėja proporcingai $1/r^2$

Vadinasi, kiekvienas sluoksnis spinduliuoja šviesą į Žemę vienodai intensyviai. Jeigu sluoksnių skaičius yra begalinis, tai nakties dangus turi būti be galo šviesus!

Olberso paradoksas. Šviesos, kurią spinduliuoja kiekvienas žvaigždžių sluoksnis, intensyvumas mažėja augant *r*. Tačiau žvaigždžių skaičius kiekviename sluoksnyje didėja augant *r* būtent taip, kad kompensuoja intensyvumo sumažėjimą

Jeigu danguje tiek daug žvaigždžių, tai kodėl taip tamsu naktį? Šis klausimas devynioliktojo amžiaus astronomams buvo pati didžiausia mįslė. Tai buvo vadinamasis Olberso paradoksas (*Heinrich Olbers*, Vokietija, 1758–1840).
Astronomai mąstė: „Niutono Visata yra begalinė ir turi begalę žvaigždžių“. „Jei taip, tai kur bepažvelgtumėte, jūsų žvilgsnis turi atsiremti į kokios nors žvaigždės paviršių, todėl nakties dangus turi būti toks pat šviesus, kaip ir vidutinės žvaigždės paviršius“. Tačiau pažvelgus naktį į dangų akivaizdu, kad taip nėra. Net išmintingiausi astronomai negalėjo rasti klaidos šiuose samprotavimuose, todėl jų išvada ir buvo vadinama paradoksu, juo labiau kad jį patvirtina matematiniai išvedžiojimai.
Dabar šis paradoksas jau nėra jokia mįslė. Visata gali būti ir begalinė, ir turėti be galo daug žvaigždžių, bet tai nėra statinė Niutono Visata. Ji plečiasi, ir dėl to plėtimosi tolimų žvaigždžių šviesa gali niekada mūsų nepasiekti, nes jos tolsta taip greitai, kad tos šviesos energija tolydžio mažėja ir galų gale iš labai tolimų žvaigždžių ji prilygsta nuliui. Tai ir palieka mus tamsoje.

Kosmologija – Visatos studijos

Visatą sudaro ne tik labai didžiuliai objektai, tokie kaip milžiniški žvaigždžių telkiniai – **galaktikos**, bet ir patys mažiausieji objektai – elementariosios dalelės, su kuriomis susipažinote 26 skyriuje. Dabar sužinosite, kaip glaudžiai susiję šie mažiausieji ir didžiausieji Visatos elementai, kai jos kilmė aiškinama naudojantis **karštojo Didžiojo Sprogimo modeliu.**

1 SVARBIAUSIOS VISATOS SAVYBĖS

Už Saulės sistemos ribų

Žvaigždės, kurias matome danguje plika akimi, yra pačios artimiausios Žemei, jų atstumai yra maždaug nuo 1 parseko (tiek nutolusi artimiausia žvaigždė Kentauro Alfa), iki kokių 500 parsekų, kadangi tolimesnių žvaigždžių paprasčiausiai jau nematyti.

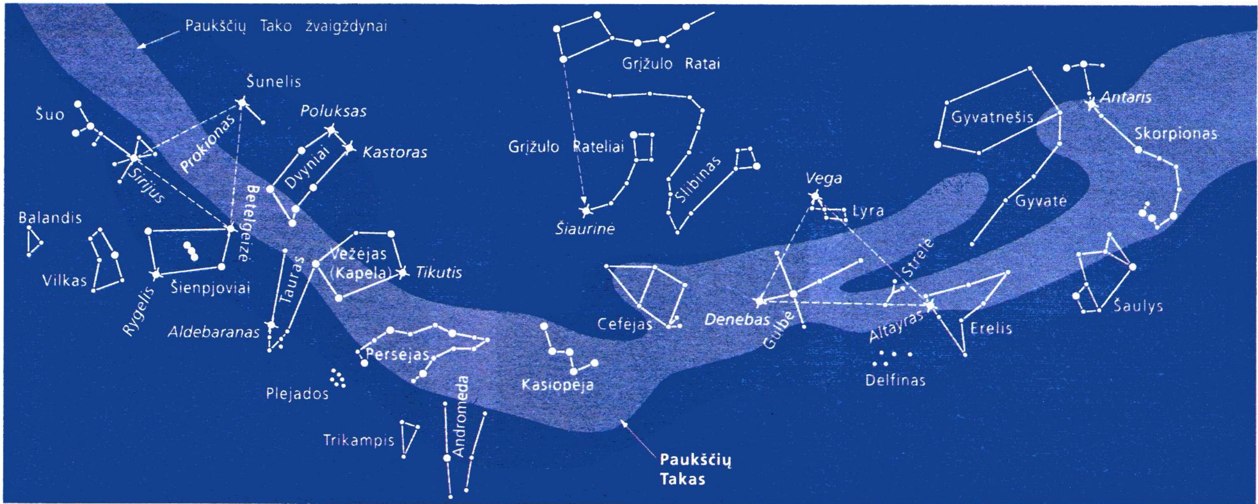
Paukščių Takas išsiskiria kaip plati netaisyklinga šviesos juosta nakties danguje. Pažvelgus kad ir pro žiūroną matyti, jog jis sudarytas iš daugybės blyškių žvaigždžių, labai artimų viena kitai mūsų regėjimo lauke.

Paukščių Take užfiksuota keli šimtai milijardų žvaigždžių. Tokio ar panašaus žvaigždžių skaičiaus darinys vadinamas **galaktika**. Jos trimatis vaizdas panašus į pateiktą 28.2a) ir b) pav.

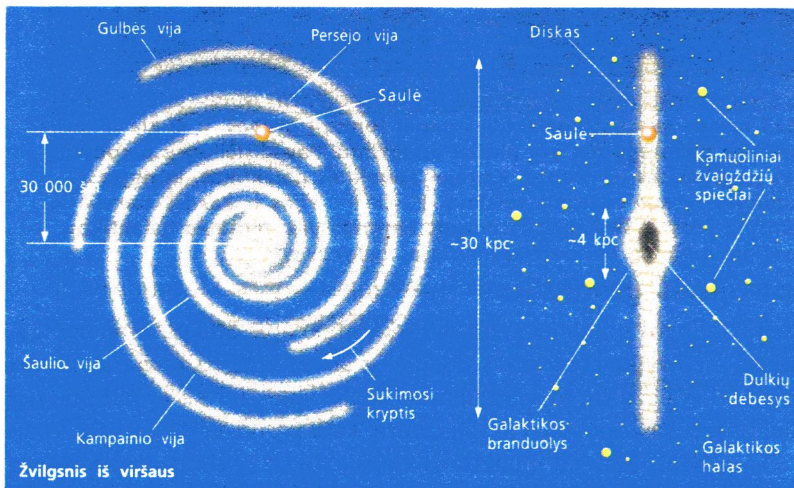
Dauguma žvaigždžių yra susispietusios palyginti siaurame **diske**, supančiame centre esantį apskritą **branduolį**. Diską dar supa didesnė elipsės pavidalo sritis, vadinama **halu**. Jame išsidėstę retos pavienės žvaigždės ir **žvaigždžių kamuoliniai spiečiai**.

Kiekvienas spiečius yra nuo 2 iki 100 pc skersmens, jame gali būti nuo tūkstančio iki milijono Saulės dydžio tankiai išsidėsčiusių ir maždaug vienodo amžiaus žvaigždžių.

1 parsekas lygus 3,26 šviesmečių.



28.1 pav. **Paukščių Tako žvaigždynai, matomi Šiaurės pusrutulio danguje (nurodyti ir kai kurių žvaigždžių pavadinimai)**



28.2a) pav. **Kairėje: Žvilgsnis į Paukščių Taką iš viršaus. Mūsų galaktikos spiralinių vijų formos ir padėtys nustatytos pagal jų turimų dujų debesų spinduliuojamas radijo bangas. Saulė yra Šienpjovių vijoje**

28.2b) pav. **Dešinėje: Paukščių Tako modelis. Saulė yra spiralinės vijos pakraštyje, nutolusi maždaug 9 kpc nuo galaktikos centro**

28.2 pav. matyti, kad žvaigždės išsidėsčiusios ilgose vijose, besivyniojančiose nuo galaktikos branduolio. Jos sudaro diską, kurio skersmuo yra apie 30 kpc. Saulė yra žvaigždė, truputį mažesnė už vidutinę ir besanti spiralinės vijos pakraštyje, nutolusi maždaug du trečdalius atstumo nuo galaktikos centro.



28.3 pav. **Paukščių Takas Šiaurės pusrutulio vasaros danguje, matomas kaip žvaigždžių ir švytinčių dujų ūkų juosta. Dulkių debesys užstoja kai kurių žvaigždžių šviesą**

Už Paukščių Tako

Jau senieji astronomai buvo pastebėję, kad šalia žvaigždžių kosmose galima pamatyti ir kitokių objektų, dažniausiai atrodančių kaip apšviestų dujų ir dulkių debesys. Jie buvo pavadinti **ūkais (nebulėmis)**, nuo atitinkamo lotyniško žodžio *nebulae*, reiškiančio debesis.

Č. Mesjė (*Charles Messier*, Prancūzija, 1730–1817) pirmasis sudarė tų paslaptingų objektų – ūkų, žvaigždžių spiečių ir galaktikų – sąrašą, kuris žinomas kaip Mesjė katalogas. Dauguma ryškių ūkų šiaurės pusrutulio danguje dar ir dabar žymima simboliais, kuriais jie pažymėti tame kataloge. Andromedos galaktika (28.4 pav.), pavyzdžiui, žymima Mesjė 31, arba trumpiau – M31. Kitoje sistemoje, naudojamoje ūkams, galaktikoms ir žvaigždžių spiečiams žymėti, prieš numerį stovi skaičiai NGC.

Tik kiek vėliau astronomai suprato, kad dauguma šių ūkų yra ne dujų debesys, o daugelio milijardų žvaigždžių telkiniai, esantys labai toli palyginti su atstumais iki Paukščių Tako žvaigždžių. Jie buvo pavadinti **užgalaktiniais objektais**.



28.4 pav. **Andromedos galaktika, vienintelė, kurią Šiaurės pusrutulyje galima matyti be teleskopo.** Ji yra maždaug du kartus didesnė už mūsiškę ir nutolusi **770 kpc atstumu. (Kiti du matomi šviesūs objektai taip pat yra galaktikos.)**

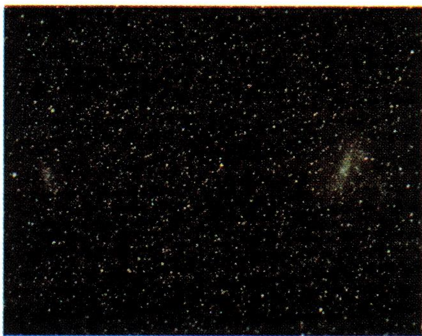
■ Žr. 1 ir 2 klausimus.



28.6 pav. **Spiralinė galaktika M83, esanti pietų pusrutulyje Hidros žvaigždyne. Jos skersmuo apie 30 000 šm, o atstumas iki jos apie 10 milijonų šm**



28.7 pav. **Elipsinė galaktika NGC 1199**



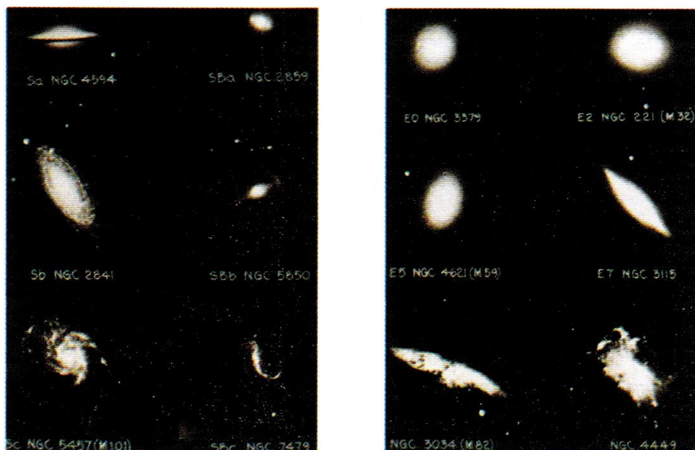
28.8 pav. **Netaisyklingosios galaktikos Didysis ir Mažasis Magelano Debesys. Jos yra artimiausios Paukščių Tako kaimynės Vietinėje grupėje, nutolusios maždaug dviejų Paukščių Tako skersmenų atstumu**

Žr. 3 klausimą.

2 GALAKTIKŲ KLASĖS

Kiekviena galaktika gali būti priskirta vienai iš trijų klasių (28.5 ir 28.6 pav.):

- Spiralinių galaktikų, tokių kaip Paukščių Takas.
- Elipsinių galaktikų, kurios neturi matomos struktūros.
- Netaisyklingųjų galaktikų, kurios neturi nei struktūros, nei formos.



28.5 pav. **Amerikiečių astronomas E. Hablas (*Edvin Hubble*, 1889–1953) 1925 metais suskirstė galaktikas pagal formą į grupes, ir ši klasifikacija, šiek tiek pakoreguota, yra plačiai pripažinta. Paveikslėliuose parodytos trys pagrindinės jų grupės. Kairėje: Spiralinės galaktikos, kurioms būdingas ryškus centrinis telkinys, išreikštos vijos ir kartais tamsi centrinė juosta. Dešinėje: Pirmosios keturios yra elipsinės galaktikos, apačioje matome dvi netaisyklingąsias galaktikas**

Spiralinės galaktikos

Charakteringos spiralinės galaktikos skersmuo apie 30 kpc. Spiralinė galaktika – tai ryškus objektas su daugybe jaunų žvaigždžių vijose, iš viso apie 10^{11} žvaigždžių; jo spinduliavimo galia apie 10^{10} kartų didesnė nei Saulės. Ji sukasi apie savo masių centrą, kaip parodyta 28.2a) pav.

Žvaigždžių, esančių galaktikos vijose, spektrai rodo, kad jose yra sunkiųjų elementų (metalų), kurie gali būti susidarę tik sprogus supernovai, o tai reiškia, kad jos yra iš debesų, suformuotų ankstesniųjų žvaigždžių kartų. Spiralines galaktikas užpildančiose **tarpžvaigždinėse dujose** yra nemažai vandenilio, jų tankis yra apie 6 atomai 1 m^3.

Tarpžvaigždinės dujos spinduliuoja būdingas 21 cm bangos ilgio radijo bangas. Pagal šių bangų Doplerio poslinkį, sukeltą jų sukimosi, astronomai yra nustatę ir mūsų galaktikos spiralinių vijų formas.

Manoma, kad spiralinių galaktikų vijas vieną nuo kitos kadaise atskyrė smūginės bangos, plintančios per dujų ir dulkių debesis, kurie užpildo galaktikų erdvę. Šios bangos supresuoja debesis ir skatina jų gravitacinį traukimąsi, dėl kurio ir susidaro žvaigždės.

Elipsinės galaktikos

Elipsines galaktikas sudaro daugiausia senos žvaigždės. Jos nėra labai ryškios ir jų spektruose retokai sutinkami sunkiųjų elementų (metalų) pėdsakai. Jos paprastai mažesnės nei spiralinės galaktikos, tik kokių 10 kpc skersmens, o jų spinduliavimo galia net gerokai mažesnė, tesiekianti apie 10^8 Saulės galios. Elipsinėse galaktikose daug mažiau dujų ir dulkių, o tai reiškia, kad jose žvaigždės jau nesusidaro.

Netaisyklingosios galaktikos

Netaisyklingosios yra mažesnės už pirmųjų dviejų tipų galaktikas, jų vidutinis dydis yra apie 7 kpc. Jų masės yra apie 10^8 Saulės masių, tačiau spin-

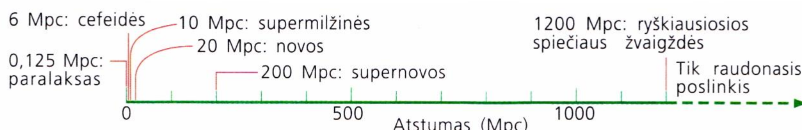
desys siekia 10^9 Saulės spindesių, taigi jos pagal savo masę yra gana ryškios. Jos turi daug jaunų žvaigždžių, kuriose negausu metalų, bet turi ir pakankamai dujų ir dulkių, kuriose intensyviai susidarinėja naujos žvaigždės.

3 GALAKTIKŲ DYDŽIŲ, MASIŲ IR ATSTUMŲ IKI JŲ MATAVIMAI

Atstumai iki kai kurių Visatos objektų pateikti 28.1 lentelėje.

28.1 lentelė

Objektas		Atstumas	Matavimo metodai
Sirijus (Šienpjoviai)	Artima žvaigždė	2.6 pc	Paralaksas (trigonometrija)
Didysis Magelano Debesis	Maža netaisyklinga galaktika, artima Paukščių Takui	50 kpc	Cefeidžių pulsavimas
Andromedos galaktika M31	Didžiausia Vietinės grupės galaktika (spiralinė)	770 kpc	Cefeidžių pulsavimas
Mergelės spiečius	Artimiausias didelis galaktikų spiečius mūsų vietiniame superspiečiuje	20 Mpc	Cefeidžių pulsavimas, novos (sproginėjančios žvaigždės), supermilžinės
Heraklio galaktikų superspiečius	Artimiausias mums superspiečius	200-300 Mpc	Supernovos, ryškiausiosios spiečiaus žvaigždės
Hidros spiečius	Didelis galaktikų spiečius	1200 Mpc	Ryškiausiosios spiečiaus galaktikos
3C-324	Viena tolimiausių galaktikų, atstumą iki kurios pavyko išmatuoti	2500 Mpc	Raudonasis poslinkis, jei $H = 85$ km · s^{-1} · Mpc^{-1}
Q0000-263	Vienas tolimiausių kvazarų, atstumą iki kurio pavyko išmatuoti	3600 Mpc	Raudonasis postūmis su tuo pačiu H



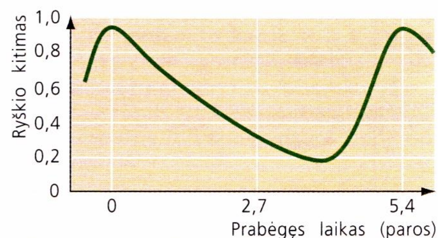
28.9 pav. **Astronominių objektų matavimai**

Atstumus iki artimiausiųjų žvaigždžių galima išmatuoti naudojantis trianguliacija, t. y. **paralakso** metodu, aprašytu 300 p. Deja, tokie objektai, kaip galaktikos, yra per toli, kad jų paralaksą būtų galima išmatuoti.

Artimiausioji nuo Žemės didelė galaktika yra Andromedos galaktika (M31), parodyta 28.4 pav. Tai buvo pirmoji galaktika, atstumą iki kurios pavyko išmatuoti 1923 m. Astronomai, remdamiesi prielaida, kad ji yra du kartus didesnė už Paukščių Taką ir turi būti du kartus ryškesnė, susiejo jos regimąjį ryškį su absoliučiuoju jos ryškiu ir atstumu iki jos d 301 p. aprašytu būdu:

$$\text{šviesos srauto tankis, matuojamas Žemėje, } F = \frac{L}{4\pi d^2}$$

Remiantis šiuo labai paprastu sąryšiu gautas atstumas iki M31, lygus 450 kiloparsekų, t. y. daug didesnis negu iki tolimiausiųjų Paukščių Tako žvaigždžių. Patikslinus šį rezultatą paaiškėjo, kad iš tiesų atstumas yra dar didesnis ir lygus 770 ± 30 kpc.



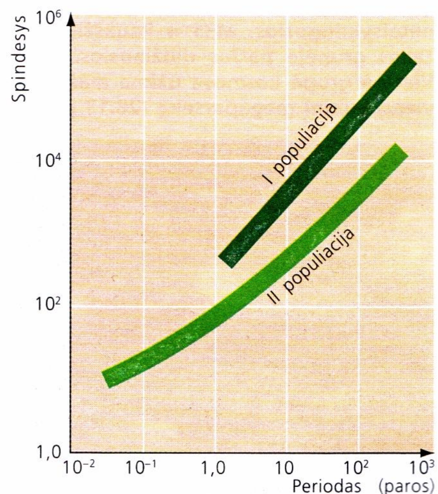
28.10a) pav. **Cefėjo delta žvaigždės, kuri yra pulsuojanti cefeidė, spindesio kreivė. Spindesio kitimo periodas yra pastovus, didžiausioji jo vertė pasiekiama kas 5,6 paros**

Atstumas, ryškis ir cefeidžių pulsavimas

Edvinas Hablas buvo pirmasis astronomas, nuodugniai tyręs galaktikas ir atstumus iki jų, naudodamasis tais laikais didžiausiu pasaulyje teleskopu, 2,5 m skersmens Niutono reflektoriumi Maunt Vilsone Kalifornijoje, JAV.

Jis taip pat naudojo labai veiksmingą metodą matuoti atstumams iki galaktikų, paremtą ypatingų žvaigždžių, vadinamų **pulsuojančiomis cefeidėmis**, arba trumpiau – tiesiog cefeidėmis, savybėmis. Jų pavadinimas kilęs iš Cefėjo žvaigždyno Delta žvaigždės, kuri buvo pirmoji ištirta šio tipo žvaigždė; vėliau cefeidžių tipo žvaigždės buvo aptiktos ir kitose galaktikose, taip pat ir M31.

Šių žvaigždžių spindesys periodiškai ir labai reguliariai kinta, kaip parodyta 28.10 a) pav., tačiau svarbiausia jų savybė yra dar ir ta, kad to kitimo periodas yra susijęs su jų absoliučiuoju ryškiu (28.10b) pav.).



28.10b) pav. **Supaprastinta cefeidžių periodo ir spindesio priklausomybė, atspindinti beveik tiesinį sąryšį tarp absoliučiojo ryškio ir periodo logaritmo**

A Pulsuojanti cefeidė, kurios absoliutusis ryškis yra –2,5, Žemėje matoma kaip 14,5 regimojo ryškio objektas. Įsitikinkite, kad ji yra nutolusi maždaug 25 kpc atstumu.

Žr. 4, 5 ir 6 klausimus, taip pat užduotį 1 šio skyriaus pabaigoje.

Deja, Hablas, kaip ir bet kuris to meto astronomas, dar nežinojo, kad egzistuoja dvi cefeidžių rūšys, ir todėl naudojosi neteisingais duomenimis. Dėl to visi jo galaktikų atstumų matavimai yra netikslūs, nurodantys, kad galaktikos yra gerokai arčiau, nei yra iš tikrųjų. Pavyzdžiui, jo nustatytas atstumas iki M31 buvo 330 kpc, tuo tarpu tikrasis yra 770 kpc.

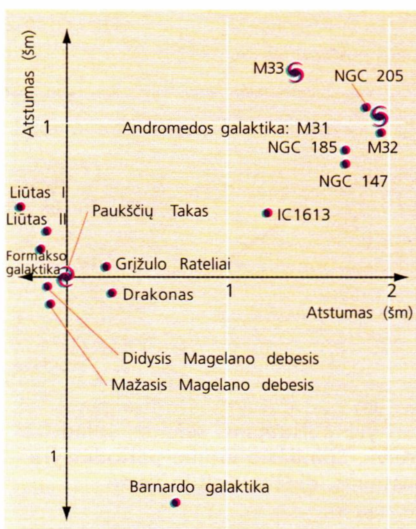
Pagal cefeidžių sąryšį galima nustatyti absoliutųjį jų ryškį, regimasis yra nesunkiai išmatuojamas, todėl naudojantis formule

$$M = m + 5 - 5 \log D$$

galima lengvai rasti atstumą D. Cefeidės yra daug ryškesnės už Saulę, tačiau netgi jos, būdamos toliau nei 6 Mpc atstumu, jau yra per blyškios, kad būtų galima matuoti jų ryškio kitimo skirtumus ir periodus.

Ryškiausiųjų objektų panaudojimas

Ta pati formulė, siejanti atstumą iki objekto ir jo regimąjį bei absoliutųjį ryškius, gali būti panaudota išmatuoti atstumams iki objektų, kurių spindesys yra kaip nors pagrįstai numanomas. Pavyzdžiui, tikėtina, kad visų žvaigždžių supermilžinių spindesys yra toks pat, kur jos bebūtų. Pagal jas galima matuoti atstumus iki 10 Mpc, pagal supernovas, kurios irgi turėtų būti visos vienodos, – atstumus iki 200 Mpc. Atstumai iki 1200 Mpc yra vertinami remiantis prielaida, kad ryškiausiosios galaktikos visuose spiečiuose taip pat yra vienodo dydžio ir turi tokią pat spinduliavimo galią.



28.11 pav. **Kai kurios pagrindinės Vietinės grupės galaktikos. Dauguma galaktikų yra elipsinės arba netaisyklingosios, M31 ir Paukščių Takas grupėje pačios didžiausios. Vietinė grupė kosmose užima maždaug vieną kubinį megaparseką (28.13 pav.)**



28.12 pav. **Elipsinės ir spiralinės galaktikos Mergelės spiečiuje, kurį sudaro keletas tūkstančių galaktikų. Tai artimiausias Vietinei grupei didelis spiečius, nutolęs nuo jos apie 19 Mpc atstumu**

4 GALAKTIKŲ SPIEČIAI IR SUPERSPIEČIAI

Paukščių Takas ir Andromeda yra dvi didžiausios **Vietinės grupės** – galaktikų **spiečiaus** iš maždaug 30 narių, galaktikos. Vietinės grupės matmenys visomis kryptimis sudaro apie 1 Mpc. Minėtos didžiausiosios – Paukščių Tako ir Andromedos – galaktikos sukasi viena apie kitą ir labiausiai veikia visų kitų judėjimą.

Mergelės spiečius yra artimiausias Vietinei grupei, nutolęs nuo jos maždaug 20 Mpc atstumu Mergelės žvaigždyno kryptimi. Nedidelis jo fragmentas parodytas 28.12 pav. Tai didžiulis spiečius, jo regimi kontūrai sudaro apie 3 Mpc. Danguje jis užima plotą, 14 kartų didesnį nei Mėnulis. Deja, šios galaktikos yra taip toli, kad nematomos plika akimi. Mergelės spiečiuje yra keletas tūkstančių galaktikų, todėl jo gravitacinis laukas yra toks stiprus, kad jis net veikia Vietinės grupės judėjimą.

Išmatavus atstumus matyti, kad beveik visos galaktikos yra susigrupavusios į didesnius ar mažesnius spiečius. **Spiečių dydžiai** kinta labai plačiose ribose. Yra spiečių, kuriuos sudaro tik viena pora galaktikų, yra spiečių, kuriuose galaktikos yra gana toli viena nuo kitos, yra ir spiečių, kurių galaktikos yra labai artimos viena kitai ir juda bendrame visų sukurtame gravitaciniame lauke.

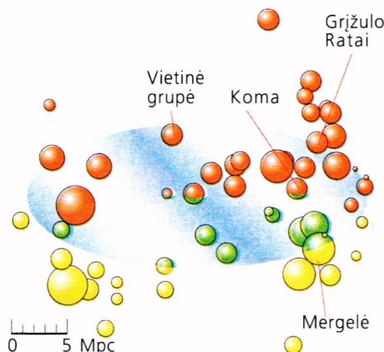
Galaktikų spiečiai telkiasi į dar didesnes grupes, vadinamas **superspiečiais**. Mūsų superspiečiui priklauso apie 382 galaktikų spiečiai, jo dydis yra apie 700 Mpc (28.13 pav.). Vietinė grupė yra jo centre, o Mergelės spiečius – pakraštyje.

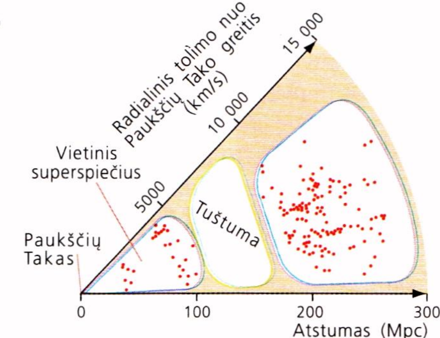
Tarp mūsų superspiečiaus ir artimiausiojo jo kaimyno, esančio Heraklio žvaigždyne, yra maždaug 100 Mpc dydžio tuščia erdvė, kaip matyti 28.14 pav. Superspiečiai ir tuštumos tarp jų yra būdingas reiškinys ištirtoje Visatos dalyje. Tai parodyta 28.15 pav. Gali būti, kad būtent taip materija buvo pasiskirsčiusi Visatos užuomazgoje.

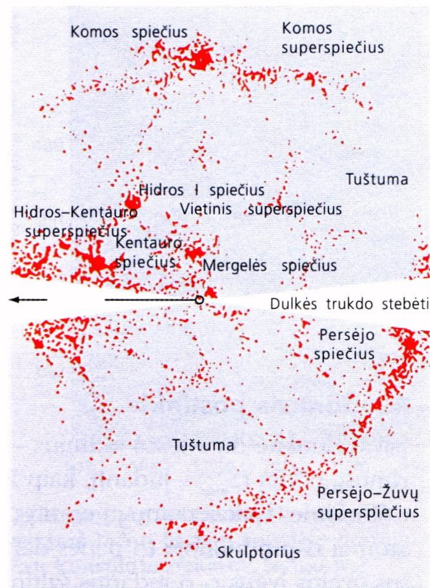
28.13 pav. Kairėje: Vietinis superspiečius, kurio centre yra Vietinė grupė. Kiekviena sfera vaizduoja galaktikų spiečių, o jos dydis yra proporcingas joje esančių galaktikų skaičiui. Virš disko esantys spiečiai pažymėti raudonai, žemiau disko – geltonai

28.14 pav. Dešinėje: tarp Vietinio superspiečiaus ir jo kaimyno, Heraklio superspiečiaus, yra tuštuma, kurioje yra vos kelios galaktikos

28.15 pav. Dvimatė netolimųjų spiečių, superspiečių ir tuštumų išsidėstymo schema, kurios centre pažymėtas Paukščių Takas. Kiekvienas taškas čia atitinka vieną ar keletą galaktikų. Trimačiame vaizde spiečiai panašūs į putas vonioje arba kempinę, kurioje medžiagos tarpus užpildo tuštumos







5 BESIPLEČIANTI VISATA

1929 m. Hablas, remdamasis Doplerio efektu, išmatavo 24 galaktikų, įvairiai nutolusių nuo Žemės, greičius. Jis atrado, kad visos šios galaktikos skriejo tolyn nuo mūsų, ir kuo labiau nutolusi buvo galaktika, tuo didesnis buvo jos tolìmo greitis. Jis nustatė labai paprastą sąryšį, vadinamą Hablo dėsniu, tarp atstumo iki galaktikos D ir jos tolìmo greičio v:

$$v = HD$$

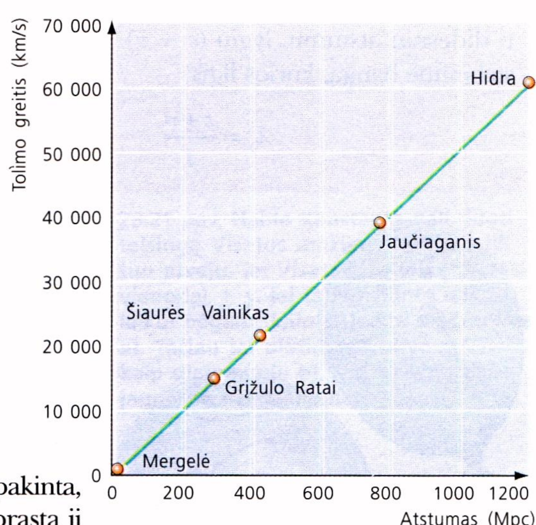
kur H yra Hablo konstanta. Tolìmo greitį v galima surasti pagal kokio nors elemento kokios nors žinomos spektrinės linijos raudonąjį poslinkį. Šie poslinkiai galaktikoms, esančioms penkiuose palyginti netolimuose spiečiuose, parodyti 28.16 ir 28.17 pav.



Radialinis greitis (km^{-1})	Atstumas (Mpc)
0	0
1210	19
1510	300
21600	430
39300	770
61200	1200

28.16 pav. Kairėje: Kiekvienai išvardytų galaktikų jonizuoto kalcio H ir K linijos pasislenka link ilgesniųjų bangų (raudonųjų) palyginti su laboratorijoje matuojamomis padėtimis. Galaktikos tolìmo greitis randamas pagal Doplerio formulę

28.17 pav. Dešinėje: Duomenys, pateikti 28.16 pav. ir atvaizduoti šioje diagramoje, rodo, kad yra tiesinė priklausomybė tarp galaktikos tolìmo greičio ir atstumo iki jos



Doplerio efektas pasireiškia tuo, kad spektrinių linijų dažniai pakinta, kai spinduliuotės šaltinis ir imtuvas juda vienas kito atžvilgiu. Įprasta jį matuoti bangos ilgio pokyčiu $\Delta\lambda$. Kai judėjimo greitis lygus v, gauname:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_e} = \frac{v}{c} \text{ arba } \frac{\lambda_0 - \lambda_e}{\lambda_e} = \frac{\lambda_0}{\lambda_e} - 1 = \frac{v}{c}$$

Čia λ_e yra spinduliuojamos bangos ilgis, o λ_0 – stebimos Žemėje tos pačios bangos ilgis. c, kaip įprasta, reiškia šviesos greitį. Kosmologijoje

Žr. 4 priedą, kuriame pateiktas matematinis Doplerio efekto aprašymas.

įprastas yra raudonasis poslinkis, atitinkantis stebimą bangos ilgį, didesnį už spinduliuojamą, taigi šaltinio judėjimą tolyn nuo Žemės.

Daugiklis z

Astronomai **raudonąjį poslinkį** nusako dydžiu z, apibrėžiamu taip:

$$z = \frac{\lambda_o}{\lambda_e} - 1 = \frac{v}{c}$$

Arba, pasinaudojus Hablo dėsniu: $z = \dfrac{HD}{c}$

Raudonasis poslinkis

Įsivaizduokite du šviesos šaltinius – vieną (S_{stab}) – parimusį, o kitą (S_{jud}) – judantį, kaip 28.18 pav.

Tarkime, kiekviename jų esantys vienodi sužadinti atomai išspinduliuoja to paties dažnio f šviesą. Šviesos greitis lygus c, o judantis šaltinis juda tolyn nuo stebėtojo, esančio taške 0, greičiu v.

Praėjus sekundei po išspinduliavimo, f bangų iš šaltinio S_{stab} atsiduria c metrų atstumu, o tos pačios bangos, išspinduliuotos judančiojo šaltinio S_{jud}, įveikia didesnį atstumą, lygų $(c + v)$. Prisiminkite, kad pagal reliatyvumo teoriją šviesa iš abiejų šaltinių sklinda tuo pačiu greičiu c.

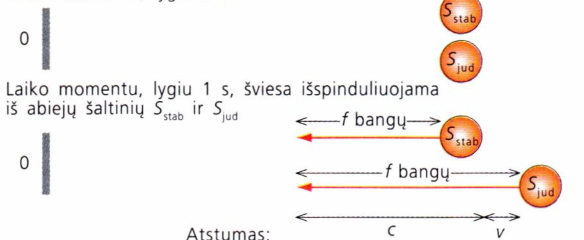
Šviesos, kuri pasiekia stebėtoją iš nejudančio šaltinio, bangos ilgis λ_e yra toks pat, kokį išspinduliavo to šaltinio atomai. Jis išreiškiamas taip:

$$\lambda_e = \frac{\text{atstumas}}{\text{bangų skaičius}} = \frac{c}{f}$$

Šviesos, kuri pasiekia stebėtoją iš judančio šaltinio, bangos ilgis bus didesnis už jo atomų išspinduliuotą, nes tas pats bangų skaičius dabar jau turi pasiskirstyti didesniu atstumu, lygiu $(c + v)$. Taigi šiuo atveju stebėsime bangą, kurios ilgis

$$\lambda_o = \frac{c+v}{f}$$

28.18 pav.



Stebimojo ir išspinduliuotojo bangų ilgių santykis bus toks:

$$\frac{\lambda_o}{\lambda_e} = \frac{c+v}{c} = 1 + \frac{v}{c}$$

Pertvarkę išraišką gauname:

$$\frac{\lambda_o}{\lambda_e} - 1 = \frac{\lambda_o - \lambda_e}{\lambda_e} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_e} = \frac{v}{c},$$

kur $\Delta\lambda$ yra bangos ilgio pokytis, sukeltas šaltinio judėjimo.

Kosmologijoje raudonojo poslinkio daugiklis z apibrėžiamas taip:

bangos ilgio pokytis / pradinis bangos ilgis,

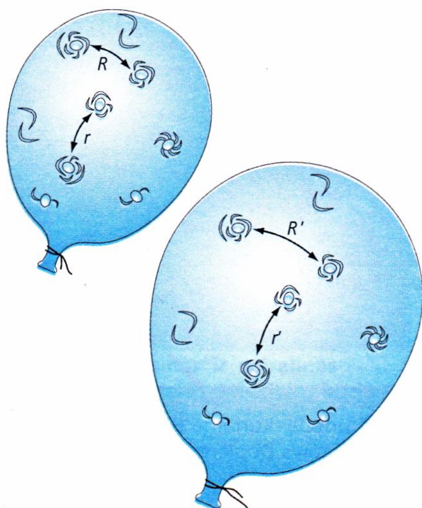
t.y. $$z = \frac{v}{c}$$

■ Žr. 7 klausimą.

Visi skrieja tolyn vienas nuo kito

Nagrinėjant šiuos rezultatus, iš pirmo žvilgsnio gali pasirodyti, kad Žemė yra Visatos centre, jei nuo jos taip tolsta visos galaktikos. Deja, tai tik iliuzija. *Kiekvienas didelis Visatos darinys* juda tolyn nuo kiekvieno kito tokio darinio. Tai paaiškinama bendrojoje reliatyvumo teorijoje kaip pačios erdvės, glaudžiai susijusios su ją sukūrusia materija, plėtimasis, lydimas ją užpildančios materijos transformacijos.

28.19 pav. šis procesas atvaizduotas paprastu dvimačiu piešinėliu. Jei ant oro baliono sužymėsime kokius nors taškus, tai pučiant tą balioną atstumai tarp taškų didės. Tų atstumų didėjimo greitis, t. y. **tolimo greitis**, priklauso nuo pradinio atstumo tarp taškų, kaip teigia ir Hablo dėsnis.



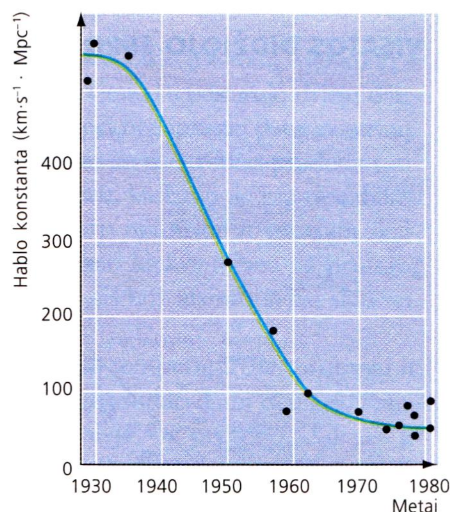
28.19 pav. **Hablo plėtimosi modelis. Pripučiant balioną, kiekviena žymė jo paviršiuje tolsta nuo bet kurios kitos žymės. (Viena jų galėtų vaizduoti Paukščių Taką). Kiekviena žymių pora tolsta viena nuo kitos greičiu, proporcingu jų pradiniam nuotoliui**

Hablo konstanta

Hablo konstantą išmatuoti labai sunku, nes atstumai iki nutolusių galaktikų matuojami labai netiksliai. Įprasta šią konstantą išreikšti tokiais vienetais:

$$\frac{\text{greitis km}\cdot\text{s}^{-1}}{\text{atstumas (Mpc)}}$$

Šiuo metu Hablo konstantos vertė yra 85 ± 30 km · s^{-1} · Mpc^{-1}. 28.20 pav. parodyta, kaip ilgainiui kito Hablo konstantos reikšmė. Tas kitimas nereiškia, kad keitėsi Visatos plėtimosi greitis; tiesiog vis tiksliau buvo matuojami atstumai iki tolimų galaktikų.



28.20 pav. **Apskaičiuotoji konstantos *H* reikšmė laikui bėgant tolydžio mažėja. Pati konstanta nekinta, tačiau per praslinkusius nuo Hablo tyrimų metus labai išaugo atstumų iki galaktikų matavimo tikslumas**

Hablo konstanta ir Visatos amžius

Pagal Hablo konstantą galima apytiksliai įvertinti Visatos amžių. Jei tarsime, kad nuo pat Visatos susiformavimo, t. y. jau t_0 metų H yra pastovi ir visą tą laiką Visata plečiasi pastoviu greičiu, tai atstumui tarp dviejų galaktikų esant lygiam D, tolìmo greitis išreiškiamas taip:

$$v = D/t_0$$

Tačiau taip pat: $v = HD$,

todėl $H = 1/t_0$.

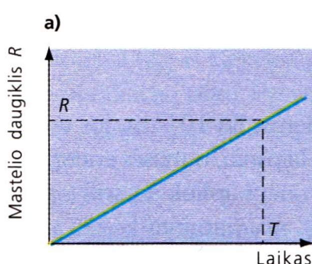
Tada Visatos amžius yra toks:

$$t_0 = 1/H = \frac{1\,\text{Mpc}}{85\,\text{km}\cdot\text{s}^{-1}}$$

Megaparsekas lygus 3,1 × 10^{19} km, taigi t_0 yra maždaug 1,2 × 10^{10} metų, arba 12 milijardų metų, arba 12 Gmetų (Gigametų).

Hablas buvo netiksliai išmatavęs atstumus iki galaktikų, todėl jo nustatytoji H vertė buvo maždaug dešimt kartų didesnė, t. y. 800 km · s^{-1} · Mpc^{-1}. Su tokia jos reikšme gaunamas maždaug 10 kartų mažesnis Visatos amžius, tik kokie 1,2 Gmetų, o tai neatitinka seniausiųjų Žemės uolienų amžiaus.

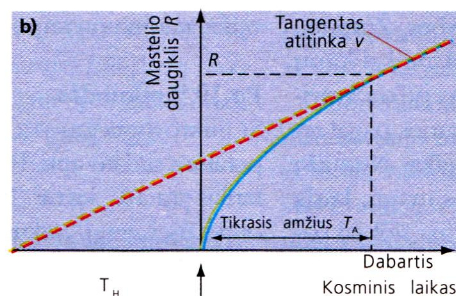
Pagal kai kuriuos šiuolaikinius matavimus gaunama dar mažesnė H vertė, netgi vos 50 km · s^{-1} · Mpc^{-1}. Su šia konstantos verte gaunamas Visatos amžius lygus apie 20 Gmetų; tai leidžia išvengti paradokso, kad kai kurios žvaigždės pasirodo besančios vyresnės už Visatą. Visos šios t_0 vertės grindžiamos tuo, kad Hablo konstanta nekito per visą Visatos gyvavimo laiką. Deja, ši prielaida gali būti neteisinga. Galbūt pradiniais momentais Visata plėtėsi šiek tiek greičiau, o tai reikštų, kad imant dabar priimtą H vertę gaunamas per mažas Visatos amžius (28.21 pav.). Nieko tikslesnio, deja, pasakyti šiuo metu dar neįmanoma.



Posvyris = greitis = $\frac{R}{T}$ = v

$v = HR$ (H – Hablo konstanta)

Taigi: $T = \frac{R}{v} = \frac{1}{H}$



Mastelio daugiklio R kitimo greitis lygus v (tolìmo greičiui)

$v = HR$

Kaip ir a) atveju, $T_H = \frac{R}{v} = \frac{1}{H}$

Hablo laikas $T_H > T_A$

28.21 pav. **Hablo konstanta gali duoti teisingą Visatos amžiaus reikšmę tik tuo atveju, jei Visata visą laiką plėtėsi vienodai, t. y. jei ta konstanta nekito laikui bėgant, kaip pateikta diagramoje a). Tačiau jei plėtimasis buvo toks, kaip diagramoje b), Visata gali būti jaunesnė nei manoma**

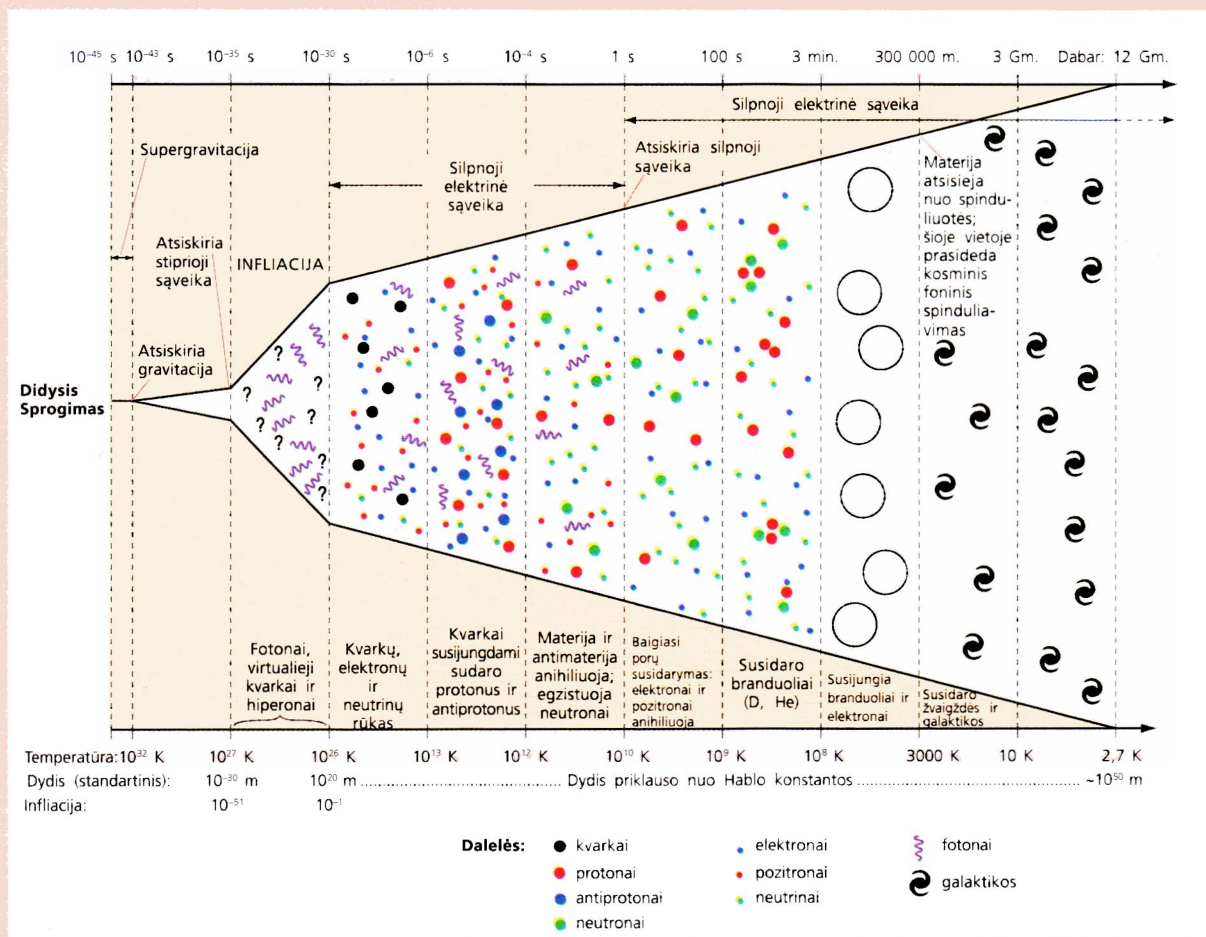
?

B Patikrinkite tris nurodytas Visatos amžiaus vertes, išreikštas metais, naudodamiesi trimis atitinkamomis H vertėmis.

■ Žr. 8, 9 ir 10 klausimus.

VISATOS DIDŽIOJO SPROGIMO MODELIS

28.22 pav. Standartinis Visatos Didžiojo Sprogimo modelis



Šiuolaikinis Visatos susidarymo modelis prasideda nuo tarytum neįmanomo ir baigiasi neapibrėžtumu. Neįmanoma yra tai, kad pradžioje visa turėjo būti sukoncentruota viename taške – **singuliariniame taške**. Tai ne tik sunku įsivaizduoti, – tai reiškia, kad jame negalioja jokie fizikos dėsniai.

Modelio privalumas tas, kad nepaisant to pirmojo neįmanomo momento, toliau fizikos dėsniai paaiškina beveik visas stebimosios Visatos ypatybes. Žinoma, teorijoje yra ir trūkumų, ji negali paaiškinti kai kurių reiškinių, o ir eksperimentais iki šiol neaptikta gravitacinių bangų nei gravitonų – dalelių, kurios pagal teoriją turėtų perduoti gravitacinę sąveiką. Nemaža mįslė yra ir ta, kad didelė dalis Visatos masės, kurią ji privalo turėti, yra neaiškios kilmės ir iki šiol jai paaiškinimo nerasta.

Toliau pateikiamas Visatos evoliucijos scenarijus – **Didžiojo Sprogimo** modelis, kurio schema parodyta 28.22 pav. Gilinantis į šį scenarijų gali tekti grįžti į 26 skyrių, kuriame aprašytos subatominių dalelių savybės.

Pirmosios trys minutės

Tarkime, Visatos plėtimasis buvo nufilmuotas; jei paleistume tą filmą nuo galo, galų gale pasiektume tašką, kai visa, kas sudaro Visatą – erdvėlaikis, spinduliuotė ir materija – yra supresuota iki matmenų, daug kartų mažesnių nei protono dydis. Šiame labai ankstyvame Visatos evoliucijos taške visos keturios fundamentaliosios sąveikos buvo susijungusios į vieną sąveiką, vadinamą **supergravitacija**.

Po 10^{-43} sekundės

Ši mikrovisata jau yra išsiplėtusi iki 10^{-35} m, jos temperatūra sudaro apie 10^{32} K laipsnių, o masės energijos tankis yra 10^{97} kg/m^3. Nieko nėra aplink šią sritį – nei *erdvės*, nei netgi „vakuumo“, nes šiame taške yra visa Visata. Šiuo momentu mums žinoma gravitacijos jėga atsiskiria nuo pradinės supergravitacijos sąveikos.

Plėtimuisi tęsiantis milžiniška jėga suslėgti didžiulių energijų fotonai dalį savo energijos paverčia *virtualiųjų kvarkų* rūku, kurio dalelės jungiasi virsdamos didesniosiomis virtualiosiomis dalelėmis ir antidalelėmis. Kaip žinoma, virtualiosios dalelės gali gyvuoti

tik labai trumpą laiką, kadangi neapibrėžtumo principas, t. y. Heizenbergo nelygybė, reikalauja, kad jų masės energijos ir gyvavimo laiko sandauga būtų mažesnė už Planko konstantą h.

Po 10^{-35} sekundės: staigi labai greita infliacija

Nuo pat pradžių Visata vis plėtėsi ir vėso. Tačiau po 10^{-35} s atsiskyrė ir *stiprioji* sąveika, palikdama susijungusias į *silpnąją elektrinę* tik dvi paskutiniąsias, t. y. *elektromagnetinę* ir *silpnąją*, sąveikas. Jai atsiskyrus plėtimasis staiga labai paspartėjo, ir prasidėjo procesas, vadinamas **infliacija**, kuris tęsėsi iki 10^{-32} s. Per šį laiką Visata padidėjo 10^{50} kartų ir pasiekė apelsino dydį.

Infliacijos metu ji taip pat labai atvėso, dabar jos temperatūra jau buvo tik 10^{26} K. Tokioje temperatūroje iš fotonų jau galėjo pradėti susidarinėti realių dalelių ir antidalelių poros: *kvarkai* ir *antikvarkai*, *elektronai* ir *pozitronai*. Dėl to fotonų skaičius, kaip ir jų energija, ėmė mažėti. Besitęsiant plėtimuisi ir vėsimui, kvarkai pradėjo jungtis sudarydami labai masyvias ir trumpai gyvuojančias daleles – hiperonus, taip pat stabiliuosius *protonus* ir *antiprotonus*.

Po mikrosekundės

Ankstyvojoje Visatoje mikrosekundė yra labai didelis laiko tarpas. Po tiek laiko ji jau buvo išsiplėtusi iki Saulės sistemos dydžio, o jos temperatūra nukritusi iki 10^{13} K laipsnių. Ši temperatūra jau per maža, kad iš fotonų galėtų susidaryti sunkiosios dalelės. Iš tikrųjų šiuo metu aktyviai vyko ir atvirkščias procesas, kai dėl susidūriančių protonų ir antiprotonų anihiliavimo materijos kiekis pradėjo greitai mažėti.

Jeigu protonų ir antiprotonų skaičius būtų buvęs visiškai vienodas, tuo metu Visata būtų sudaryta vien tik iš spinduliuotės, kurios energija jau būtų per maža sukurti daugiau dalelių. Laimė, iš pat pradžių buvo susidarę šiek tiek daugiau protonų nei antiprotonų, maždaug santykiu 10 000 000 001 su 10 000 000 000. Šie vieninteliai likę iš kiekvienos dešimties milijardų dalelių – antidalelių porų – protonai būtent ir sudaro visas dabar egzistuojančias žvaigždžes ir galaktikas.

Po sekundės

Temperatūrai nukritus iki 10^{10} K, fotonai jau neįstengia sudaryti netgi elektronų ir pozitronų porų. Dabar prasideda antroji didžiulė materijos ir antimaterijos anihiliacija, atsiranda daug fotonų, bet vėlgi, kadangi elektronų yra šiek tiek daugiau nei pozitronų, po šios anihiliacijos medžiagos (elektronų) lieka būtent tiek, kad jie kompensuotų likusių protonų krūvį, o bendras Visatos krūvis būtų lygus nuliui.

Šiuo metu Visatą sudaro karštoji fotonų, elektronų ir protonų plazma, turinti vienodai pastarųjų dviejų dalelių. Joje taip pat egzistuoja nepaprastai daug neutrinų.

Susiduriant protonams su elektronais pradeda susidarinėti neutronai. Tačiau, kadangi jie yra nestabilūs, susidaro pusiausvyra tarp neutronų ir protonų skaičiaus, maždaug tokia, kad kiekvieniems 14 protonų susikuria du neutronai (iš kur atsiranda šie skaičiai, paaiškinta 11 klausime).

Vėliau, dar žemesnėse temperatūrose, protonai ir neutronai pradeda jungtis sudarydami deuterio (vandenilio, kurio branduolyje, be protono, dar yra ir neutronas), o vėliau ir helio, branduolius. (Branduolio ir dalelių teorijos teigia, kad neutronų ir protonų yra tiek, kad atsiradusių vandenilio ir helio branduolių masių santykis turi būti 3/1. Šį santykį patvirtina šiandieniniai eksperimentai.) Vėstant plazmai daugiau jokie sunkesnieji branduoliai susidaryti jau negali.

Po trijų minučių

Per šį laiką vis dėlto susidaro šiek tiek lengvųjų ličio (^{7}Li) ir berilio (^{9}Be) izotopų ir nusistovi nauja pusiausvyra, kadangi atstumai tarp dalelių tampa palyginti dideli, ir jų susidūrimai tampa jau nebe tokie energingi, kad galėtų susidaryti dar kokie nors sunkesnieji branduoliai. Tai įvyksta tik vėliau, žvaigždėse prasidėjus branduolių sintezei (285 p.).

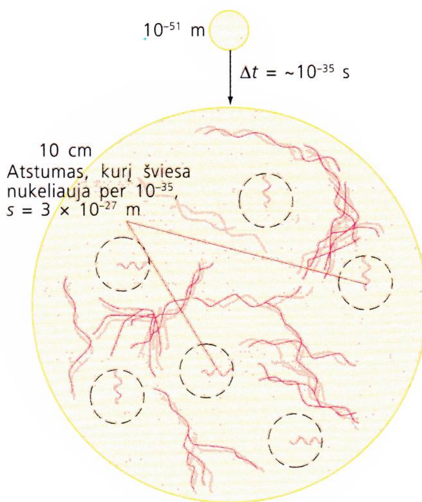
Per sekančius 300 000 metų

Po savo pirmųjų 300 000 metų Visata yra plazmos kamuolys, sudarytas iš elektronų, protonų ir helio branduolių. Visi atomai yra jonizuoti. Fotonai, susidūrinėdami su krūvininkais, praranda energiją ir negali plisti. Galima sakyti, Visata šiuo momentu nepraleidžia spinduliuotės.

Tik nukritus temperatūrai iki kokių 3000 K branduoliai gali pasigauti elektronus ir sudaryti stabilius atomus, kadangi tokių fotonų energijos tampa jau nepakankamos jiems suardyti. Dėl to Visata tampa skaidri savo pačios spinduliuotei.

Temperatūrai dar labiau nukritus, šios spinduliuotės intensyvumo maksimumas atsiduria ties 10^{-3} m, t. y. artimųjų infraraudonųjų dažnių diapazone. Būtent nuo šios evoliucijos fazės prasidėjęs reliktinis spinduliavimas, vadinamas dar ir **kosminiu foniniu spinduliavimu**, yra aptinkamas ir šiuo metu. Šis spinduliavimas plinta beveik vienodai iš visų pusių ir jo intensyvumų pasiskirstymas atitinka spinduliuotę juodojo kūno (žr. 1-os d. 305 ir 2-os d. 29 p.), kurio temperatūra yra tokia, iki kurios atvėsusi besiplečianti Visata, t. y. maždaug 3 K laipsniams.

■ Žr. 12 klausimą.



28.23 pav. **Manoma, kad plėtimosi metu ir po jo nevienalytiškumai negalėjo „išsilyginti", kadangi sparčioji infliacija juos „užšaldė"**

Keturios fundamentaliosios sąveikos yra gravitacinė, silpnoji, elektromagnetinė ir stiprioji

Mįslė – pirmieji trys milijardai metų

Tiesą sakant, fizikams daug aiškiau, kas atsitiko Visatoje per pirmąsias tris jos gyvavimo minutes nei per pirmuosius tris milijardus metų. Šiuolaikinė elementariųjų dalelių teorija patikimai pagrindžia scenarijų, aprašytą išplėstiniame intarpe. Tačiau iš paprasto Didžiojo Sprogimo scenarijaus išplaukia, kad galaktikos turi būti beveik tolygiai pasiskirsčiusios erdvėje. Ne taip jau sunku būtų įvesti į modelį kokius nors nestabilumus, kurie galėjo būti pradiniu žvaigždžių ir galaktikų susidarymo momentu ir sukelti stebimus netolygumus jų pasiskirstyme, tačiau yra visiškai neaišku, kaip materija galėjo pasiskirstyti į stebimus galaktikų superspiečius ir kodėl jie iki šiol nevienalyčiai, tarsi putų burbulai, kaip pavaizduota 28.15 pav.

GUT ir Guth

Būdas, kaip išspręsti šią problemą, 1980 metais yra pasiūlytas amerikiečio fiziko – teoretiko A. Guto (*Alan Guth*). Jis pagrindė supergravitacijos teoriją prielaida, kad esant pakankamai aukštoms energijoms visos fundamentaliosios sąveikos susivienija į vieną sąveiką. Ši Didžiojo susivienijimo teorija, sutrumpintai nuo anglų ***grand unification theory*** ir žymima **GUT**, nusako labai staigią infliaciją, aprašytą išplėstiniame intarpe. Bent kokie Visatos nevienalytiškumai infliacijos metu staiga padidėja ir išsiplečia į tuos nevienodus ir kiek skirtingo tankio burbulus. Vėliau, laikui bėgant, Visata plečiasi taip greitai, kad tie nevienalytiškumai jau neišsilygina ir ilgainiui išsivysto į galaktikų spiečius ir superspiečius (28.23 pav.).

KOSMINIS FONINIS SPINDULIAVIMAS

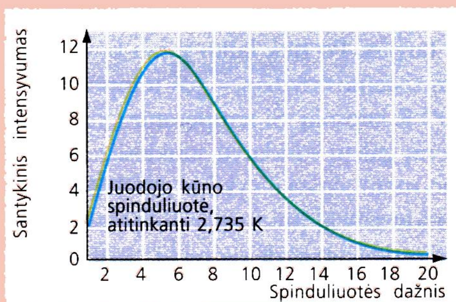
Žemos temperatūros spinduliuotės, kuri užpildo visą erdvę, egzistavimas buvo aptiktas visiškai atsitiktinai 1965 m. Jos buvimas buvo nuspėtas dar 1948 m. G. Gamovo, R. Alpero ir R. Hermano, bet po to užmirštas.

Arno Penzias ir Robertas Vilsonas, du Belo telefonų kompanijos fizikai, tikrino savo sukurtą mažą, bet labai jautrų radioteleskopą, skirtą 7 cm bangos ilgio spinduliuotei tyrinėti. Sistemoje jie aptiko gana stiprius įkyrius triukšmus, kurių niekaip neįstengė nuslopinti. Taip pat jie pastebėjo, kad, priešingai įprastiems triukšmams, šie yra nekintami bet kuriuo paros metu ir nepriklauso nuo krypties, kuria nukreiptas teleskopas. Akivaizdu, jiems nebeliko nieko kito, – tik manyti, kad aptiktas ne triukšmas, o *kosmologinės prigimties spinduliuotė*.

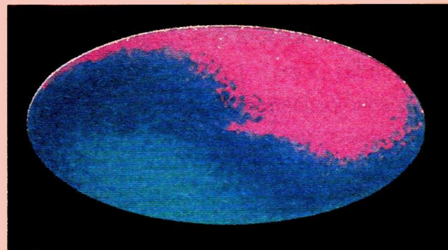
Fizikus, kurie tikrino Gamovo, Alpero ir Hermano teoriją, Penzias ir Vilsono pranešimas labai nudžiugino, nes jis davė vieną pirmųjų ir labai rimtą argumentą Didžiojo Sprogimo scenarijui pagrįsti. Nuo to laiko atlikta daugybė tikslių šios spinduliuotės matavimų ir dabar jau nėra jokių abejonių, kad tai iš tiesų yra pirminės universaliosios spinduliuotės reliktas (28.24 pav.).

Šios spinduliuotės keblumas buvo tik tas, kad ji buvo pernelyg tolydi, kad būtų galima paaiškinti jos prigimtį. Masių persiskirstymas Visatoje ir jo nevienalytiškumas skatino manyti, kad ir šios spinduliuotės tankis turi būti nevienalytis, o stebėtasis paneigė šią viltį. Priežastys, kurios privertė materiją išsidėstyti netolygiai, turėjo kažkaip atsispindėti ir šios spinduliuotės pasiskirstyme. Galų gale tik po septynerių metų kruopščių tyrimų specialaus palydovo, pavadinto Kosminio fono stebėtoju (*Cosmic Background Explorer* – COBE) prietaisais, pavyko įrodyti (1992 metais), kad šios spinduliuotės pasiskirstymo tankis, kaip ir turi būti, nėra toks jau tolygus.

28.25 pav. pateikta Visatos nuotrauka foninio spinduliavimo diapazone. Įvairūs atspalviai rodo šios spinduliuotės temperatūros skirtumus, vos apie 0,01%. Iš tiesų tai yra Visatos nuotrauka, kai ji buvo 300 000 metų amžiaus.



28.24 pav. **Mikrobangų spinduliuotės spektras, užregistruotas Cosmic Background Explorer (COBE) palydovo aparatūra. Atkreipkite dėmesį į jo panašumą su juodojo kūno spinduliavimo kreivėmis, pateiktomis 14.4 pav.**



28.25 pav. **Viso dangaus mikrobangų žemėlapis, užregistruotas COBE aparatūra 5,7 × 10^{-3} m ilgio bangoms. Jame matyti, kad spinduliavimas nėra idealiai tolygus. (Spalvos pokytis iš šviesiai rožinės į mėlyną yra atsiradęs dėl Saulės sistemos judėjimo Visatoje, o horizontali juosta – dėl paties Paukščių Tako spinduliavimo)**

6 VISATOS ATEITIS

Norint visiškai paaiškinti Visatos plėtimąsi reikalinga Einšteino bendroji reliatyvumo teorija, tačiau kai kuriuos svarbius dalykus galime pagrįsti ir Niutono mechanika.

Įsivaizduokite galaktiką, esančią pakraštyje didelio sferos pavidalo tūrio, bet kaip pasirinkto Visatoje, kaip parodyta 28.26 pav. Sferoje yra galaktikų spiečiai, visi tolstantys vienas nuo kito. Niutono teorija teigia, kad pasirinktą galaktiką veikia tik jėgos, kurias sukuria galaktikos, esančios sferos *viduje*. Poveikiai visų masių, esančių sferos išorėje, pasinaikina, jei tos masės, t. y. galaktikos, yra išsidėsčiusios tolygiai. Aišku, kad begalinėje Visatoje galime kaip norime pasirinkti ir tą sferą, ir galaktiką. Akivaizdu tik viena – visos galaktikos veiks pasirinktąją jėga, besipriešinančia jos tolimui.

Kas galų gale atsitiks su ta galaktika, priklauso tik nuo jos kinetinės ir gravitacinės potencinės energijos sumos, t. y. nuo jos pilnosios energijos E:

$$E = E_K + E_P$$

čia E_K yra kinetinė energija, kuri visada teigiama, o E_P – potencinė energija, begalybėje virstanti nuliu. Kaip parodyta 28.27 pav., galimi trys scenarijai:

1. *E* lygi nuliui
Tai reiškia, kad pradžioje kinetinė energija yra lygi absoliutinei neigiamos potencinės energijos vertei. Galaktika tokiu atveju tols nuo kitų tolydžio lėtėdama, kinetinei jos energijai virstant potencine. Po be galo didelio laiko ji nuskries į begalybę.

2. *E* yra neigiama
Šiuo atveju E_P absoliutinė vertė yra didesnė už E_K. Vadinasi, kinetinė galaktikos energija yra nepakankama, kad ji galėtų įveikti gravitacinę trauką. Atvejis panašus į mestą aukštyn akmenį, kuris po kurio laiko pradeda kristi žemyn. Tas pats atsitinka ir su ta galaktika, o tai reiškia, kad visa Visata po kurio laiko susitraukia atgal į pradinę būseną. Tai vadinama Didžiuoju sutraiškymu.

3. *E* yra teigiama
Šiuo atveju galaktika turi pakankamai kinetinės energijos, kad nuskrietų į begalybę, netgi greičiau nei pirmuoju atveju. Šis scenarijus yra beprasmis Niutono Visatoje, bet įgauna prasmę bendrojoje reliatyvumo teorijoje, kur gravitacija egzistuoja ne kaip jėga, o kaip masės sukurto erdvėlaikio kreivumas. Abi teorijos sutampa tik ta prasme, kad Visatos likimą nulemia joje esančios masės tankis.

Apibendrinant galima pasakyti, kad jei masės tankis Visatoje yra per mažas, įvyksta pirmasis arba trečiasis scenarijai, jei jo pakanka, gali vykti antrojo scenarijaus numatyti procesai.

28.26 pav.

28.27 pav. **Trys galimi Visatos likimo variantai. Y ašyje atidėtas bet koks labai didelis atstumas, kuriuo jau neveikia gravitacija**

Devyniasdešimt procentų Visatos vis dar nėra aptikta

■ Žr. 13 klausimą.

Visatos tankio įvertinimai matuojant medžiagos, kurią mes pajėgiame išmatuoti savo prietaisais, masę, duoda labai mažas vertes – tik kokius 4×10^{-28} kg/m^3, taigi tik vieną vandenilio atomą kiekvienoje dešimtyje kubinių metrų. Kad Visata stabiliai plėstųsi, kaip pirmuoju išnagrinėtu atveju, reikėtų turėti šiame tūryje bent jau 70 tokių atomų. Tačiau daryti kokias nors išvadas remiantis šiuo rezultatu yra per anksti, nes nagrinėjant galak-

■ Žr. užduotį 2 šio skyriaus pabaigoje.

Dabartinis spindulys	13×10^9 šm
	$1{,}2 \times 10^{23}$ m
	4×10^9 Mpc
Hablo konstanta H	85 km · s^{-1} · Mpc^{-1}
Amžius	10 Gmetų
Hablo laikas 1/H	12 Gmetų
Masė	$5{,}7 \times 10^{53}$ kg
Tankis	$1{,}5 \times 10^{-26}$ kg/m^3
Žvaigždžių skaičius (Saulės dydžio)	$2{,}9 \times 10^{23}$
Galaktikų skaičius	$1{,}6 \times 10^{12}$

28.2 lentelė. **Visatos duomenys**

tikų ir jų superspiečių elgesį pastebėta, kad matoma medžiaga gali pagrįsti tik apie 10 procentų masės, kuri sukelia reikiamas gravitacijos jėgas.

Nematomoji medžiaga tarytum labai ir nepaveikia šviesos išeigos, todėl panašu, kad ji sudaryta iš dulkių debesų. (Dujų debesys sudaro tik nuo 5 iki 15 procentų galaktikos masės.) Dabar tos medžiagos paieškos yra labai intensyvios. Tai galėtų būti arba užgesusios *juodosios žvaigždės*, arba nežinoma materijos forma, sudaryta iš masyvių, bet *silpnai sąveikaujančių dalelių* (anglų k. santrumpa – *WIMPs*), *neutrinai* (jų labai daug, todėl, jei kiekvieno jų masė būtų bent kokie 2,4 eV, jie turėtų pakankamą suminę masę), *juodosios bedugnės* (kad labai netrikdytų galaktikų, jų masės neturėtų viršyti 10^6 Saulės masių) arba kokio nors visų šių paslaptingų darinių derinio.

28.2 lentelėje pateikti Visatos duomenys, aprašyti šiame skyriuje.

SANTRAUKA

Išnagrinėję šio skyriaus medžiagą, jūs galite:

- Suprasti, kodėl Olberso paradoksas teigia, kad statinė begalinė Visata negali egzistuoti.
- Sužinoti, kad Visata yra sudaryta iš žvaigždžių ir tarpžvaigždinės medžiagos, susijungusių į tokius darinius kaip galaktikos, galaktikų spiečiai ir jų superspiečiai.
- Sužinoti, kaip gali būti matuojami atstumai iki žvaigždžių ir kitų tolimų objektų.
- Suprasti, kaip Doplerio efektas yra panaudojamas galaktikų greičiams matuoti.
- Sužinoti apie Visatos plėtimosi pobūdį ir matavimus, raudonąjį poslinkį, Hablo dėsnį ir Hablo konstantą.
- Suprasti Didžiojo Sprogimo scenarijų, dalelių fizikos reikšmę aprašant pirmąsias Visatos minutes ir galėti pateikti šio modelio pagrindimo įrodymus, tokius kaip kosminis foninis spinduliavimas arba elementų pasiskirstymas Visatoje.
- Sužinoti Visatos amžių ir galimą jos likimą, priklausomai nuo jos tankio ir Hablo konstantos vertės.

KLAUSIMAI

Naudingos formulės: $M = m+5 - 5\log \Delta v = HD$

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_e} = \frac{v}{c}$$

1 Kai kurie ūkai yra netolimi dujų debesys, kiti – milijardų žvaigždžių spiečiai. Kodėl devynioliktojo amžiaus astronomai negalėjo suprasti, kad tai yra labai skirtingi dariniai?

2 Kuo skiriasi galaktikos ir kamuoliniai žvaigždžių spiečiai?

3 Nubraižykite schemą, apibrėžiančią esmines spiralinės galaktikos struktūros ypatybes.

4 Būdingos supermilžinės absoliutusis ryškis lygus $M = -8{,}0$. Ji matoma Žemėje kaip objektas, kurio regimasis ryškis yra $m = 18$. Kaip toli yra ši žvaigždė? (Išreikškite atsakymą megaparsekais.)

5 Parašykite maždaug 1000 žodžių rašinį apie astronominių atstumų matavimą.

6 Tarkime, galima išmatuoti atstumą iki kokios nors galaktikos. Kaip pagal rezultatą įvertinti, kiek žvaigždžių yra toje galaktikoje? Aprašykite du šio įvertinimo metodus, paremtus vidutinės žvaigždės charakteristikų panaudojimu.

7 Keleto galaktikų, esančių tolimame spiečiuje, vidutinis raudonasis poslinkis yra $z = 0{,}85$. **a)** Įvertinkite atstumą iki šio spiečiaus Mpc. **b)** Kodėl svarbu panaudoti šiuose skaičiavimuose būtent vidutinę raudonojo poslinkio vertę?

8 Edvinas Hablas atstumus iki palyginti netolimų galaktikų matavo metodu, kuriuo gaudavo rezultatus, kur kas mažesnius už realų atstumą. Paaiškinkite, kodėl ši klaida atsirasdavo: **a)** dėl per didelės Hablo konstantos vertės. **b)** dėl per mažo Visatos amžiaus įverčio.

9 Pasinaudokite Hablo dėsniu $v = HD$ ir nustatykite galaktikų, kurių atstumai yra: **(i)** 0,05 Mpc, **(ii)** 0,5 Mpc, **(iii)** 1 Mpc, **(iv)** 100 Mpc tolimo greičius. (Imkite $H = 85$ km · s^{-1} · Mpc^{-1} reikšmę).

10 Hablo konstanta dar ir dabar nėra tiksliai žinoma. **a)** Kodėl ją matuojant kyla tiek daug problemų? **b)** Dabartinė jos vertė yra apie 85 $km \cdot s^{-1} \cdot Mpc^{-1}$. Paaiškinkite, kodėl astronomams kiltų didelių keblumų, jei paaiškėtų, kad patikslinta jos vertė yra du kartus didesnė nei nustatytoji.

11 Tiksliausi šiuolaikiniai įvairių branduolių pasiskirstymo Visatoje (pagal mases) matavimai rodo, kad vandenilis sudaro apie 73, helis – apie 25, o visi kiti elementai – tik apie 2 procentus. Anihiliavus materijai ir antimaterijai, Visata buvo pakankamai karšta, kad elektronams jungiantis su protonais, susidarytų neutronai. Neutrono gyvavimo laikas yra apie 11 minučių. Standartiniame modelyje, pasinaudojus žinomu elementariųjų dalelių elgesiu, yra teigiama, kad per sekančias tris minutes išliko stabilus neutronų ir protonų santykis – maždaug du neutronai keturiolikai protonų, kurie po to jungėsi, sudarydami kiek galint daugiau helio branduolių. **a)** Kiek helio-4 branduolių gali susidaryti iš šių 16 nukleonų? **b)** Kiek protonų po to lieka? **c)** Koks yra susidariusių helio branduolių masės santykis su visa reagavusių nukleonų mase? **d)** Koks yra analogiškas vandenilio branduolių masės santykis? Paaiškinkite, kodėl vandenilio vertė nesutampa su pateikta aukščiau.

12 Kodėl dalelių fizika yra tokia svarbi aiškinant reiškinius, vykusius Visatoje pirmosiomis jos gyvavimo minutėmis?

13 Kokie fizikiniai veiksniai lemia, ar Visata visada plėsis, ar galų gale plėtimasis sustos, ir ji pradės trauktis?

Užduotis

CEFEIDŽIŲ PULSAVIMAS

Pulsuojanti cefeidė yra žvaigždė, kurios spindesys periodiškai kinta. Pulsacijų periodas yra tiksliai apibrėžtas ir susijęs su žvaigždės spinduliavimo galia, taigi ir su jos absoliučiuoju ryškiu (jis apibrėžiamas kaip žvaigždės regimasis ryškis tuo atveju, jei ji būtų 10 parsekų atstumu). Kuo didesnis pulsacijų periodas, tuo didesnis absoliutusis ryškis. Tai leidžia astronomams rasti atstumą iki tokios cefeidės, tuo pačiu ir atstumą iki tolimos galaktikos, kurioje galima rasti tokių žvaigždžių.

28.U1 lentelėje parodytas ryšys tarp kai kurių cefeidžių, aptinkamų mūsų galaktikoje, absoliučiojo ryškio M ir pulsacijų periodo. Šios žvaigždės yra pakankamai arti, kad būtų galima išmatuoti atstumą iki jų D kitais metodais, taigi jų absoliutusis ryškis M gali būti nustatytas išmatavus jų regimąjį ryškį m ir susiejus juos žinoma formule:

$$m - M = 5 \log (D/10)$$

Periodas (paros)	Absoliutusis ryškis
2,0	−2,4
3,1	−2,6
4,9	−3,1
5,4	−3,5
5,5	−3,6
6,3	−3,8
6,7	−3,9
8,0	−3,9
9,8	−4,1
10,8	−3,6
10,9	−4,4
13,6	−4,8
18,9	−5,1
27,0	−5,6
41,4	−5,8
45,0	−6,2

28.U1 lentelė. Kai kurių cefeidžių pulsacijų periodai ir jų absoliutieji ryškiai

1

a) Nubrėžkite cefeidės absoliučiojo ryškio priklausomybės nuo periodo kreivę.
b) Apibūdinkite šią kreivę.
c) Pakomentuokite, kodėl cefeidės yra astronomams tokios svarbios dideliems atstumams matuoti.

2

a) Išmatavus pulsuojančios cefeidės periodą paaiškėjo, kad jis lygus 12 parų. **(i)** Įvertinkite šios žvaigždės absoliutųjį ryškį. **(ii)** Kokia galėtų būti procentinė šios reikšmės paklaida?
b) Pakartokite skaičiavimus, atliktus dalyje a) žvaigždei, kurios periodas lygus 42 paroms.
c) Pastarosios žvaigždės, kurios periodas yra 42 paros, regimasis ryškis lygus +12,5. Naudodamiesi pateikta formule raskite atstumą iki jos, taip pat skaičiavimų paklaidą.
d) Žvaigždės, kurios pulsacijų periodas yra 42 paros, regimasis ryškis lygus +19. Kaip toli ji yra?

3 Gerais teleskopais jau galima stebėti žvaigždes, kurių regimasis ryškis lygus 29. Ryškiausios cefeidės absoliutusis šviesis lygus −6,4. Kaip toli gali būti nutolusi tokia žvaigždė, kad dar būtų galima išmatuoti atstumą iki jos?

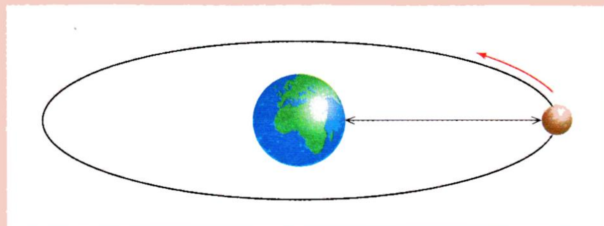
Užduotis

NEMATOMOJI MATERIJA

Pagal Niutono visuotinės traukos dėsnį galima nustatyti didelio kūno masę M naudojantis dviejų paprastų matavimų rezultatais:

Greičio v, kuriuo juda koks nors šios masės palydovas.

To palydovo atstumo R iki jo ir kūno masių centro.



28.U1 pav.

Prilyginę, palydovą veikiančią įcentrinę jėgą gravitacinei traukos jėgai, gauname:

$v = \sqrt{(GM/R)}$

Ši formulė gali būti panaudota rasti Saulės masei, kai žinomas kokios nors planetos orbitinis greitis ir atstumas iki jos. Panašiai galima rasti ir tolimos galaktikos masę. Žvaigždės juda orbitomis apie galaktikos centrą. Pavyzdžiui, Saulė yra nutolusi nuo galaktikos centro maždaug 9 kpc ir juda maždaug 210 km/s greičiu. Gravitacijos jėga, kuri verčia Saulę judėti orbita, yra sukurta visų žvaigždžių, kurios yra arčiau galaktikos centro nei ji.

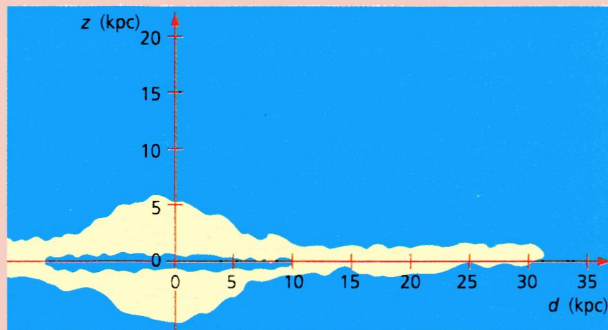
1 Remdamiesi šia informacija ir duomenimis, pateiktais užduoties pabaigoje, įvertinkite Paukščių Tako masę. (Jūs turėsite pasinaudoti modeliu, kad Paukščių Takas yra sfera, ir Žemė yra jos paviršiuje.)

Astronomai gali įvertinti galaktikos masę ir kitu būdu – pagal jos spindesį. Galaktikos, turinčios įprastinį įvairaus tipo žvaigždžių pasiskirstymą, spinduliavimo galia turėtų būti proporcinga sudarančių ją žvaigždžių skaičiui. Tai galima išreikšti masės ir spindesio santykiu. 28.U2 lentelėje yra pateikti šie duomenys, vienetui prilyginus atitinkamą Saulės santykį.

28.U2 lentelė

Objektas	Masė / spindesys
Saulė	1
Spiralinės galaktikos branduolys	Nuo 1 iki 3
Spiralinės galaktikos diskas	Nuo 2 iki 5

Viena didžiausių kosmologijos problemų yra ta, kad įvertinus galaktikų, jų spiečių ir superspiečių mases šiais dviem būdais gaunami labai skirtingi rezultatai. Atrodo, kad didelių Visatos objektų gravitacinė masė yra kokia dešimt kartų didesnė už jų spinduliuojamų objektų masę. Kitais žodžiais tariant, 90% Visatos yra nematoma. Tokios didelės dalies galaktikų skleidžiamos šviesos negali sugerti jų kelyje pasitaikantys dujų ir dulkių debesys, šis efektas yra nepalyginamai mažesnis.



28.U2 pav.

28.U3 lentelėje pateikiama informacija apie galaktiką NGC 2998, kuri kitu pavidalu pateikta taip pat 28.U2 pav. Tai žvaigždžių, nutolusių įvairiais atstumais d nuo galaktikos centro, raudonojo poslinkio z vertės. Jos patikslintos atsižvelgus į raudonąjį poslinkį, kurį sukelia tos galaktikos masių centro tolimas nuo Žemės.

28.U3 lentelė

Atstumas d (kpc)	Raudonasis poslinkis z (10^{-4})
0	0
3	3,0
5	5,22
6	6,33
7	6,33
10	6,16
12	6,00
14	6,16
17	6,40
20	6,33
22	6,40
25	6,26
27	6,50
30	6,67
35	6,67

2

a) Paverskite z vertes, pateiktas 28.U3 lentelėje, į žvaigždžių orbitinius greičius km/s, naudodamiesi sąryšiu $z = v/c$.

b) Nubrėžkite grafike šio orbitinio greičio priklausomybę nuo žvaigždės atstumo nuo galaktikos centro d.

Daugiausiai šviesos spinduliuoja galaktikos centras, t. y. sritis, kurios spindulys pateiktame pavyzdyje lygus apie 10 kpc. Jeigu didžiausia galaktikos masės dalis būtų sukoncentruota šioje erdvėje, žvaigždžių, esančių spiralinėse vijose, judėjimas būtų kiek kitoks.

3 Tarkime, kad didžiausioji galaktikos masės dalis yra sukoncentruota jos centre, t. y. 10 kpc spindulio sferoje. Tokiu atveju žvaigždės, nutolusios nuo galaktikos masių centro atstumu R, greitis galėtų būti apskaičiuotas naudojantis supaprastinta formule

$v = K/\sqrt{R}$

kur K yra konstanta, v išreikštas km/s, o R – kiloparsekais.

a) Pasinaudokite žvaigždės, nutolusios 10 kpc atstumu, duomenimis ir nustatykite konstantą K, o tada apskaičiuokite, kokie būtų žvaigždžių, nutolusių 15, 20, 25, 30 ir 35 kpc atstumu, greičiai.

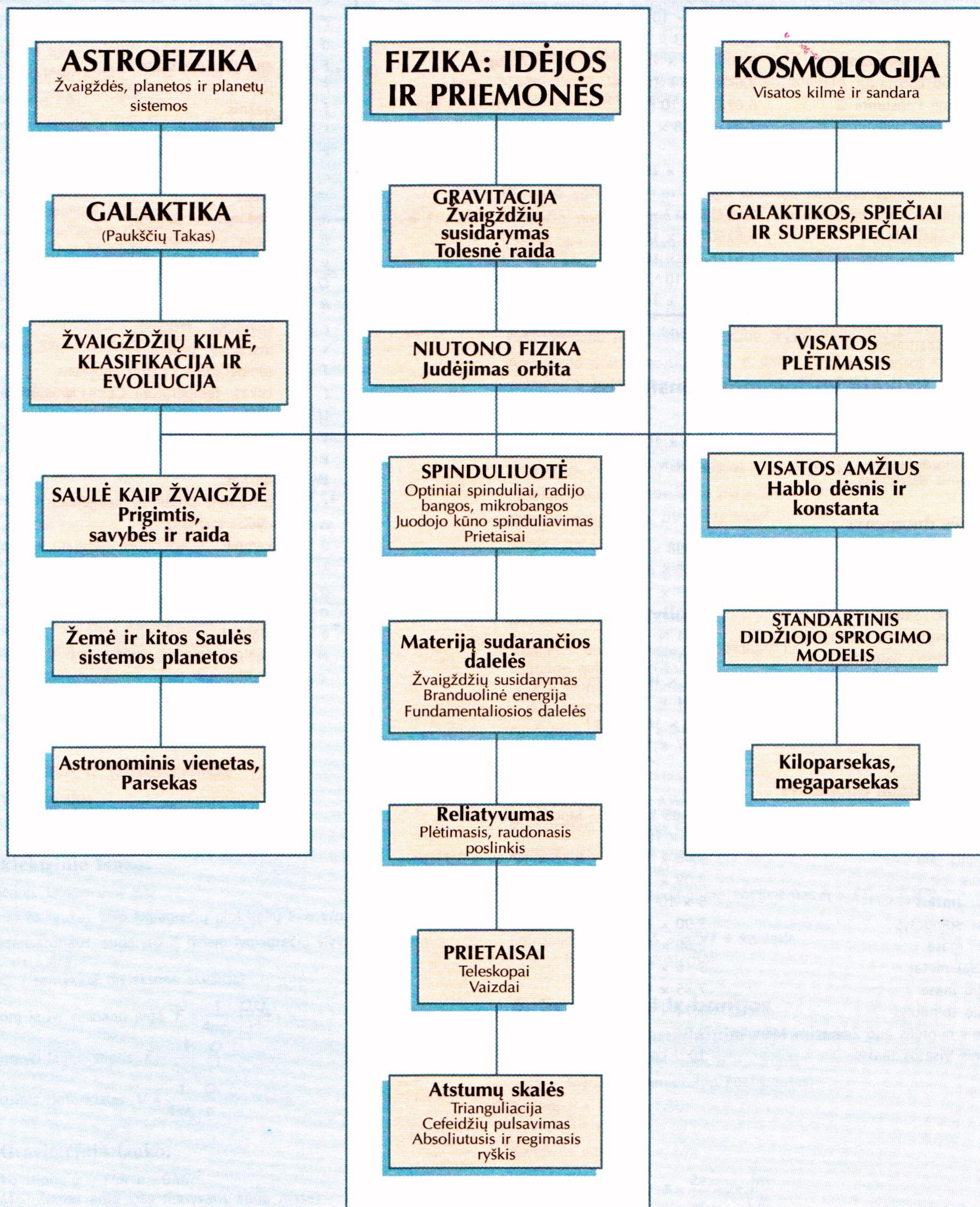
b) Atidėkite gautas reikšmes grafike, analogiškam tam, kurį brėžėte 2 užduoties dalyje.

c) Pakomentuokite, kuo skiriasi šie brėžiniai. Kokias išvadas galima iš jų padaryti apie masių pasiskirstymą galaktikoje? (Patarimas: Pagalvokite, kaip kistų v, jei masė pastoviai augtų didėjant R). Nubrėžkite bent jau apytikslį šios priklausomybės grafiką.

Duomenys: 1 kpc = $3{,}09 \times 10^{19}$ m, c = $3{,}00 \times 10^{8}$ $m \cdot s^{-1}$, G = $6{,}67 \times 10^{-11}$ m^3 kg^{-1} s^{-2})

ASTROFIZIKA IR KOSMOLOGIJA

Šioje schemoje pateikiamos pagrindinės 27 Astrofizika ir 28 Kosmologija skyrių sąvokos. Išnagrinėję šią schemą jūs išsiaiškinsite klausimus, kuriuos esate dar nepakankamai gerai suvokę.



1 PRIEDAS: FIZIKINIAI DYDŽIAI IR JŲ SĄRYŠIAI

A. Fizikos konstantos ir dydžiai

1. Pagrindinės fizikos konstantos

Konstanta	Vertė	Vienetas
Avogadro skaičius N_A	$6{,}0221367 \times 10^{23}$	mol^{-1}
Bolcmano konstanta k	$1{,}380658 \times 10^{-23}$	$J \cdot K^{-1}$
Elektrono krūvis e	$1{,}60217733 \times 10^{-19}$	C
Elektrono rimties masė m_e	$9{,}1093897 \times 10^{-31}$	kg
Faradėjaus konstanta F	$9{,}6485309 \times 10^{4}$	$C \cdot mol^{-1}$
Gravitacinė konstanta G	$6{,}67259 \times 10^{-11}$	$N \cdot m^2 \cdot kg^{-2}$
Šviesos greitis vakuume c	$2{,}99792458 \times 10^{8}$	$m \cdot s^{-1}$
Molinė dujų konstanta R	8,314510	$J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$
Neutrono rimties masė m_n	$1{,}6749286 \times 10^{-27}$	kg
Magnetinė skvarba vakuume μ_0	$4\pi \times 10^{-7}$	$H \cdot m^{-1}$
Dielektrinė skvarba vakuume e_0	$8{,}854187817 \times 10^{-12}$	$F \cdot m^{-1}$
Planko konstanta h	$6{,}6260755 \times 10^{-34}$	$J \cdot s$
Protono rimties masė m_p	$1{,}6726231 \times 10^{-27}$	kg
Stefano ir Bolcmano konstanta σ	567051×10^{-8}	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$
Atominės masės vienetas u	$1{,}6605402 \times 10^{-27}$	kg

Pastaba: pateiktų konstantų vertės skaičiavimuose paprastai suapvalinamos iki dviejų reikšminių skaitmenų.

2. Kitos fizikoje vartojamos konstantos

a) Svarbiausios konstantos

Elektrinio lauko konstanta $k = 1/4\pi\varepsilon_0$	$9{,}0 \times 10^{9}\ m \cdot F^{-1}$
Vieno molio dujų tūris normaliomis sąlygomis	$22{,}4 \times 10^{-2}\ m^{-3}$

b) Žemės duomenys

Žemės masė	$5{,}998 \times 10^{24}$ kg
Žemės amžius	$\sim 4{,}5 \times 10^{9}$ m.
Žemės spindulys (vidutinis)	$6{,}37 \times 10^{6}$ m
Atstumas iki Saulės	$1{,}50 \times 10^{11}$ m
Vidutinis gravitacinio lauko stipris g	$9{,}81\ N \cdot kg^{-1}$
Laisvojo kritimo pagreitis	$9{,}81\ m \cdot s^{-1}$
Žemės gravitacinė konstanta MG	$4{,}0 \times 10^{14}\ N \cdot m^2 \cdot kg^{-1}$
Vidutinis atmosferos slėgis	$1{,}01 \times 10^{5}$ Pa
Ištrūkimo greitis	$1{,}1 \times 10^{4}\ m \cdot s^{-1}$
Saulės konstanta	$1{,}37 \times 10^{3}\ W \cdot m^{-2}$

c) Astronominiai duomenys

Hablo konstanta (ginčytina)	$50–85\ km \cdot s^{-1} \cdot Mpc^{-1}$
Astronominis ilgio vienetas av (AU)	$1{,}5 \times 10^{11}$ m
Šviesmetis šm.	$9{,}46 \times 10^{15}$ m = $6{,}32 \times 10^{4}$ av = 0,31 pc
Parsekas pc	$3{,}09 \times 10^{14}$ m = $2{,}06 \times 10^{5}$ av = 326 šm.
Saulės amžius	5×10^{9} m.
Saulės spindesys	$3{,}90 \times 10^{26}$ W
Saulės masė	$2{,}00 \times 10^{30}$ kg
Sideriniai metai	$3{,}16 \times 10^{7}$ s
Mėnulio masė	$7{,}35 \times 10^{22}$ kg
Mėnulio spindulys	$1{,}74 \times 10^{6}$ m
Vidutinis nuotolis nuo Žemės iki Mėnulio	$3{,}84 \times 10^{8}$ m
Vidutinis Visatos tankis	$10^{-31}\ kg \cdot m^{-3}$

3. Standartiniai dydžių žymėjimai

A	poslinkis, amplitudė, plotas
a	pagreitis
B	magnetinio srauto tankis
C	talpa
c	savitoji šiluminė talpa
d	atstumas
E	energija, elektrovara
F	jėga
f	dažnis
I	srovės stipris
k	bet kokia konstanta
l	ilgis
m, M	masė
n, N	bedimensis skaičius
P	galia
p	judesio kiekis, slėgis
Q	krūvis, šiluminė energija
R	varža: elektrinė, šiluminė
r	spindulys, atstumas
s	atstumas, poslinkis
T	temperatūra Kelvino laipsniais
t	laikas, temperatūra Celsijaus laipsniais
U	vidinė energija
V	įtampa, potencialas, potencialų skirtumas
v	greitis, tūris
W	darbas
x	atstumas, poslinkis, pailgėjimas
Δ	dydžio pokytis
θ	kampas, temperatūra Celsijaus laipsniais
λ	bangos ilgis
ρ	tankis, varža
σ	elektrinis laidumas
ϕ	srautas
ω	kampinis greitis, dažnis
ϵ	elektrovara (ev)

B Formulės ir sąryšiai

Daugelis formulėse ir sąryšiuose vartojamų žymėjimų pateikta A dalyje. Kitų žymėjimų paaiškinimai pateikti skliausteliuose po formulių.

1. Judėjimas ir jėgos

Judesio kiekis $p = mv$

Galutinis judėjimo greitis $v_1 = v_0 + at$

Galutinis judėjimo greitis $v_1^2 = v_0^2 + 2ax$

Nuotolis $x = v_0t + ½at^2$

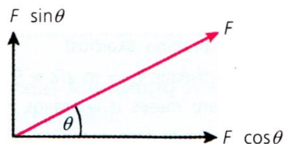
Jėga = judesio kiekio kitimo sparta = ma (masė pastovi)

Impulsas = $F\Delta t$

Kinetinė energija = $½mv^2$

Gravitacinės potencinės energijos pokytis = $mg\Delta h$

Perduota energija (darbas) = jėgos dedamoji × jėgos sukeltas poslinkis dviem statmenomis kryptimis



Jėgos momentas taško atžvilgiu = jėga × atstumas nuo taško iki jėgos veikimo linijos

Įcentrinis pagreitis $a = v^2/r$

Įcentrinė jėga $F = mv^2/r$

2. Elektra

Srovė $I = AvnQ$

Krūvis $\Delta Q = I\Delta t$

Varža $R = V/I$, $R = \rho l/A$

Nuosekliai sujungtų rezistorių varža $R = R_1 + R_2 + \ldots$

Lygiagrečiai sujungtų rezistorių varža $1/R = 1/R_1 + 1/R_2 + \ldots$

Laidumas = 1/varža

Talpa $C = Q/V$

Nuosekliai sujungtų kondensatorių talpa $1/C = 1/C_1 + 1/C_2 + \ldots$

Lygiagrečiai sujungtų kondensatorių talpa $C = C_1 + C_2 + \ldots$

Elektros energija = $½QV = ½\ CV_2$

Kondensatoriaus iškrova $Q = Q_0e^{-t}/RC$
(RC = laiko konstanta)

Galia $P = IV$

3. Laukai ir potencialas

a) Visų laukų

Lauko stipris $E = -dV/dr \approx \Delta V/\Delta r$

b) Elektrinio lauko:

Elektrinis laukas $E = F/Q$

Vienalytis laukas tarp lygiagrečių plokštelių $E = V/d$, $E = \sigma/\varepsilon_0$

Kondensatoriaus, sudaryto iš dviejų lygiagrečių elektrodų, talpa $C = \varepsilon_0\varepsilon_r A/d$
(ε_r – santykinė dielektrinė skvarba)

Taškinį krūvį veikianti jėga $F = \dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0}\dfrac{Q_1Q_2}{r^2}$

Elektrinio lauko stipris $E = \dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0}\dfrac{Q}{r^2}$

Elektrinis potencialas $V = \dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0}\dfrac{Q}{r}$

c) Gravitacinio lauko:

Lauko stipris $g = F/m = -GM/r^2$
(M – Žemės arba kito masyvaus kūno masė)

Jėga $F = -Gm_1m_2/r_2$
(r – atstumas tarp dviejų kūnų centrų)

Gravitacinės potencinės energijos pokytis $\Delta E = GM(1/r_1 - 1/r_2)$

4. Medžiaga

Tankis = masė / tūris

a) Kietieji kūnai: tamprios medžiagos

Huko dėsnis: tempimo jėga $F = kx$
(k – spyruoklės tamprumo konstanta)

Įtempis = tempimo jėga/skerspjūvio plotas

Santykinė deformacija = pailgėjimas/pradinis ilgis

Jungo modulis = tempimo įtempis/santykinė deformacija

Tamprumo potencinė energija = įtempis/santykinė deformacija

Tampriosios deformacijos energija $= \dfrac{1}{2}kx^2$

Tūrio vieneto tampriosios deformacijos energija $= \dfrac{1}{2}$ įtempis × santykinė deformacija

b) Skysčiai

Skysčio slėgis $p = \rho gh$

Bernulio lygtis $p = ½\ \rho v^2 + \rho gh = \text{const}$

Tekančio skysčio slėgis $P = ½A\rho v^2$

Stokso dėsnis: $F = 6\pi\eta rv$
(η – klampos koeficientas)

Reinoldso skaičius $R_e = \rho vr/\eta$

Skystyje judantį kūną stabdanti klampumo jėga $F = A\rho v^2$

Pasipriešinimo jėga turbulentiniame skystyje $F = Br^2\rho v^2$

Archimedo dėsnis: visiškai arba iš dalies skystyje panirusį kūną veikianti keliamoji jėga = išstumto skysčio svoriui

c) Dujos

($\overline{c^2}$ = vidutinis kvadratinis greitis, m = molekulės masė, N = molekulių skaičius, n = molių skaičius, R = idealiųjų dujų konstanta)

Idealiųjų dujų būsenos lygtis $pV = nRT$

Kinetinė dujų teorija: $pV = 1/3\ NM\overline{c^2}$

Slėgis $p = \dfrac{1}{3}\rho\overline{c^2}$

Vieno molio idealiųjų dujų vidutinė slenkamojo judesio energija = $3/2RT$

5. Šiluminė fizika

Šiluminės energijos srautas (laidumas):
srauto galia $P = k(A\Delta t)\ /\ l$
(k – šiluminis laidumas, A – skerspjūvio plotas, l = ilgis, Δt = temperatūrų skirtumas)

Perduotos šiluminės energijos („šilumos") kiekis $\Delta Q = mc\Delta\theta$

Šiluminė energija $\Delta Q = \Delta U - \Delta W$
(W – sistemos atliktas darbas)

Dujų atliktas darbas $\Delta W = -p\Delta V$

Vienatomės molekulės kinetinė energija $E_k = 3/2\ kT$

Agregatinės būsenos pokytis $\Delta Q = mL$
(L – savitoji šiluma)

Šiluminio variklio naudingumo koeficientas $\eta = (T_1 - T_2)/T_1$
($T_1 > T_2$)

Entropijos pokytis $\Delta S = \Delta Q/T = k\Delta\ lnW$
(k – Bolcmano konstanta)

6. Svyravimai ir bangos

a) Paprastieji harmoniniai svyravimai

Harmoninio svyravimo lygtis $a = -(k/m)x$
(k – spyruoklės tamprumo koeficientas)

Poslinkio ir laiko sąryšis:
poslinkis $x = A\cos\omega t$

Kampinis dažnis $\omega^2 = k/m$

Svyravimų periodas $T = \dfrac{2\pi}{\omega} = 2\pi\sqrt{\dfrac{m}{k}}$

Svyravimų dažnis $f = \dfrac{1}{T} = \dfrac{\omega}{2\pi} = \dfrac{1}{2\pi}\sqrt{\dfrac{k}{m}}$

Maksimalus greitis $v_{max} = \omega A$

Maksimalus pagreitis $a_{max} = \omega v_{max} = \omega^2 A$

Pilnoji svyravimų energija $= \dfrac{1}{2}kA^2$

b) Bangos greitis

Bangos lygtis = $A\sin(kx - \varpi t)$

Bet kokios bangos greitis $c = f\lambda$

Bangos greitis svyruojančioje sistemoje, sudarytoje iš kūno ir spyruoklės: $c = x\sqrt{k/m}$ (x – atstumas tarp spyruoklės sutankėjimų, k – spyruoklės tamprumo konstanta)

Stovinčiosios bangos stygoje lygtis $c = \sqrt{T/\mu}$ (T – tamprumo jėga, μ – ilgio vieneto masė)

Elektromagnetinės bangos vakuume greitis $c = 1/\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}$

c) Spinduliavimas ir šviesa

Vyno poslinkio lygtis: $\lambda_{max}T$ = const

Stefano ir Bolcmano lygtis: $P = \sigma AT^4$

Doplerio efektas $\Delta\lambda/\lambda_š = \Delta f/f = v/c$

($\lambda_š$ = šaltinio signalo bangos ilgis)

d) Difrakcija ir Jungo plyšiai

Už siauro plyšio: $n\lambda = b\sin\theta$ (n = eilė, b = plyšio plotis, θ = minimumų kampai)

Reilėjaus kriterijus: $\theta \geq \lambda/D$

Difrakcinės gardelės lygtis: $n\lambda = d\sin\theta$ (d = gardelės periodas, θ = maksimumų kampai)

Jungo plyšiai: $\Delta x = \lambda D/s$ (Δx = atstumas tarp juostelių, s = atstumas tarp plyšių)

7. Elektromagnetizmas

a) Magnetiniai laukai

Jėga, veikianti laidininką, kuriuo teka srovė: $F = BIl$

Jėga, veikianti judantį krūvį: $F = BQv$ (v = laukui statmena greičio dedamoji)

Srauto tankis:
- ilgo solenoido viduje $B = \mu_0 NI/l$ (N = vijų skaičius)
- šalia ilgo tiesaus laido $B = \mu_0 I/2\pi r$ (r = atstumas iki laido)
- apskritiminės vijos centre $B = \mu_0 NI/2r$ (r = vijos spindulys)

Magnetinė varža = $l/\mu_0\mu_r A$ (μ_r = santykinė magnetinė skvarba, A = plotas)

Srautas = vijų su srove skaičius/magnetinė varža

b) Indukcija

Indukuotoji elektrovara = magnetinio srauto kitimo greitis

Indukuotoji elektrovara $\epsilon = N\,d\phi/dt$ (N = laido vijų skaičius, $d\phi/dt$ = srauto kitimo greitis)

elektrovara antrinėje apvijoje $\epsilon_1 = MdI/dt$ (M – tarpusavio induktyvumas)

Potencialų skirtumas ritėje $V = LdI/dt$ (L – ritės induktyvumas)

c) Transformatoriai

Elektrovara antrinėje apvijoje $\epsilon_a = V_p N_a/N_p$ (V_p = įtampa pirminėje apvijoje, N_a ir N_p = atitinkamas vijų skaičius apvijose)

transformatoriaus: $I_p V_p > I_a \epsilon_a$

8. Kintamosios srovės grandinės

Efektinė srovė $I_e = I_0/\sqrt{2}$ (I_0 = srovės amplitudė)

Efektinė įtampa $V_e = V_0/\sqrt{2}$ (V_0 = įtampos amplitudė)

Reaktyvioji varža $X_L = \omega L$ (L = savasis induktyvumas)

Talpinė varža $X_C = 1/\omega C$

Impedansas $Z = \sqrt{(R_2 + X_2)}$

9. Atominė, branduolinė ir dalelių fizika

Radioaktyvusis skilimas $dN/dt = -\lambda N$ (λ = skilimo konstanta)

Nesuskilusių branduolių skaičius $N = N_0 e^{-\lambda t}$ (N_0 = pradinis skaičius)

Pusėjimo trukmė $t_{½} = \ln 2/\lambda \approx 0{,}693/\lambda$

Sąryšis tarp masės ir energijos $\Delta E = \Delta mc^2$

Fotonai: sąryšis tarp energijos ir dažnio $E = hf$

Dalelės: sąryšis tarp bangos ilgio ir judesio kiekio $\lambda = h/p$ (p – judesio kiekis)

Branduolio spindulys $r \sim A^{1/3}$ (A = atominė masė)

Sąryšis tarp dalelių judesio kiekio momento ir energijos $E^2 = p^2c^2 + m_0^2c^4$ (p = judesio kiekis, m_0 = rimties masė)

10. Specialioji reliatyvumo teorija

Reliatyvumo konstanta $\gamma = \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$

Įvykių nevienalaikiškumas $\Delta t = \gamma\Delta t_0$

Lorenco sutrumpėjimas $t = t_0/\gamma$

Reliatyvistinė masė $m = \gamma m_0$

11. Astronomija ir astrofizika

Keplerio dėsniai:
$R^2\omega$ = const
$GmT^2 = 4\pi R^3$
(T = orbitos apskriejimo periodas metais, R = atstumas nuo Saulės)

Žvaigždės spindesys $L = 4\pi R^2\sigma T^4$ (σ = Stefano ir Bolcmano konstanta)

Regimasis ryškis m = -2,5 log$I$ + const (I = intensyvumas)

Atstumas iki žvaigždės $d = m - M + 5\log d$ (m, M = regimasis ir absoliutinis ryškis)

Hablo dėsnis $v = HD$ (H = Hablo konstanta)

Visatos amžius = $1/H$

Raudonasis poslinkis $z = (\lambda_0/\lambda_e) - 1 = v/c$

2 PRIEDAS: MATEMATIKA FIZIKAI

Matematikos žinios, reikalingos jums studijuojant fiziką, panaudojamos keturiems svarbiausiems tikslams:
1. Skaičiavimams atlikti – t. y. gauti teisingus ir pakankamai tikslius atsakymus tais atvejais, kai atliekami įprasti skaičiavimai pagal pateiktas formules.
2. Modeliavimui – t. y. sudėtingų duomenų aibių ir įvairių sąryšių tarp fizikinių dydžių atvaizdavimui paprastu lengvai suprantamu pavidalu.
3. Įrodymams – t. y. formulėms ir sąryšiams, kurie sudaro tų modelių esmę, patikrinti.
4. Tyrimams – t. y. įvairiems rezultatams, kuriuos galima gauti naudojantis sukurtais modeliais su pakeistais pradiniais duomenimis, veikiant skirtingiems veiksniams ir netgi iš esmės pakeitus modelį, ištirti. Trumpai tariant, tai ieškojimas atsakymų į klausimą „Kas atsitiktų, jei...?“

1. Skaičiavimai

Fizika beveik niekada neapsieina be skaičiavimų, todėl bet kokie fizikos testai visada patikrina ir jūsų žinias šioje srityje. Jūs turėtumėte mokėti:

- paprastą aritmetiką ir veiksmus iki 10 laipsnio
- naudotis elektroniniu skaičiuokliu
- pasirinkti dydžių reikšmes ir jomis operuoti
- sudaryti tiesines lygtis, jas pertvarkyti ir spręsti
- braižyti ir analizuoti grafikus.

2. Matematinis modeliavimas

Studijuojant fiziką tai itin svarbu. Daugelis apibrėžimų, dėsnių ir taisyklių yra išreiškiama matematinėmis formulėmis. Dažnai naudojami **tiesiniai sąryšiai**, pvz.:

nueitas atstumas = greitis × laikas: $x = vt$

hidrostatinis slėgis = tankis × gravitacinio lauko stipris × gylis: $p = \rho gh$

jėga, veikianti spyruoklę = spyruoklės konstanta × pailgėjimas: $F = kx$

Taip pat yra sąryšių, kai vienas kintamųjų yra keliamas *laipsniu*, dažniausiai kvadratu arba kubu:

kinetinė energija = konstanta × greičio kvadratas: $E_K = \frac{1}{2}mv^2$

sferos tūris = (4π/3) × spindulys^3: $V = \frac{4}{3}\pi r^3$

galia = varža × srovė^2: $P = I^2R$

atstumas, kurį nuskrieja laisvai krintantis kūnas, iš pradžių buvęs rimties būvyje = konstanta × (kritimo laikas)^2: $x = \frac{1}{2}gt^2$

Atvirkštiniai sąryšiai – tai atskiras kėlimo laipsniu atvejis, kai tas laipsnio rodiklis lygus –1. Klasikinis pavyzdys yra Boilio dėsnis:

duotos masės dujų tūris = konstanta / slėgis

Jei dujų temperatūra nekinta,

$V = k/p = k \cdot p^{-1}$ arba $\boldsymbol{pV = k}$

PATARIMAS: Atkreipkite dėmesį į trečiąjį formulės pavidalą (pateiktas paryškintomis raidėmis); juo naudojantis galima greitai patikrinti, ar koks nors dėsnis tenkina atvirkštinį sąryšį.

Atvirkštinių kvadratų sąryšiai aprašo kai kuriuos labai svarbius fizikos dėsnius: Niutono gravitacijos dėsnį ir Kulono dėsnį, nusakantį jėgą, kuria vienas kitą veikia du elektros krūviai:

$$F = G\frac{Mm}{r_2} \qquad F = \frac{Q_1Q_2}{r^2}$$

čia G yra universalioji gravitacinė konstanta, o k – elektrinė konstanta (įprasta ją rašyti pavidalu $1/4\pi\varepsilon_0$). Atvirkštinių kvadratų sąryšiai šiuose pavyzdžiuose naudojami dėl to, kad mūsų erdvė yra trimatė – apie tai daugiau galite rasti 1-os d. 3 ir 10 skyriuose.

Taip pat svarbūs tik šiek tiek sudėtingesni **eksponentiniai** sąryšiai. Juos lengviau suvokti panagrinėjus jais aprašomus fizikinius dėsnius. Dažniausiai vartojami tokie jų pavidalai:

1. Sąryšiai, kuriuose vartojamas skaičius e
   $N = N_0e^{-kt}$. (radioaktyvusis skilimas)
   $Q = Q_0e^{-t/RC}$ (kondensatoriaus krūvio kitimas)
2. Sąryšiai, pateikti logaritminiu pavidalu:
   In $(N/N_0) = -kT$

kur ln reiškia logaritmą, kurio pagrindas e; kartais jis žymimas $\log_e$.

triukšmo lygis dB = 10 log (I/I_0)

kur log yra dešimtainis logaritmas, arba $\log_{10}$.

3. Sąryšiai, apibrėžiantys vykstantį fizikos procesą (pokytis per trumpą laiką) proporcingas (tam tikram dydžiui):
   $\Delta N = \pm kN\Delta t$; $\quad dN/N = \pm k dt$

Veiksmai su formulėmis

Jūs turite gebėti pasinaudoti bet kuriuo sąryšiu (formulėmis arba lygtimis), kad galėtumėte apskaičiuoti nežinomų dydžių vertes duotoms argumentų, nuo kurių jie priklauso, vertėms. Tam gali tekti pertvarkyti lygtį taip, kad nežinomasis būtų išreikštas duotais dydžiais (atliekami *algebriniai* veiksmai). Po to, kaip įprasta, reikia įrašyti konkrečius skaičius, atlikti *aritmetinius* veiksmus, gal net naudojant skaičiuoklį (panagrinėkite *patarimus*, kaip skaičiuoti, pateiktus 343 puslapyje).

Atlikę šiuos veiksmus jūs galėsite rasti reikiamus dydžius, išreikštus reikiamais vienetais reikiamu tikslumu (pagaliau tai ir yra *fizika*).

Jūs taip pat privalote mokėti nagrinėti dvi susijusias skaitinių duomenų aibes ir gebėti rasti jų sąryšius. Paprasčiausiu atveju tam pakanka patikrinti, kaip vienos aibės nariai priklauso nuo kitos aibės narių. Pavyzdžiui, jei pakitus argumento reikšmei, atitinkamai pakinta funkcija, tai toks sąryšis tikriausiai yra *tiesinis*:

y = konstanta × x

Jei dauginant priklausomus dydžius visada gaunamas beveik toks pat rezultatas, galima daryti išvadą, kad jie susieti *atvirkštiniu* sąryšiu, panašiu į Boilio dėsnio išraišką:

$xy = k$, taigi $y = k/x$

Paprastas eksponentinio sąryšio patikrinimas

P2.1 lentelėje pateikti duomenys, susiję (maždaug) eksponentiniu dėsniu. Jūs galite tai patikrinti paprasčiausiai tikrindami „vienodą santykį", t. y. kad jei argumentui kintant vienodu žingsniu paeiliui einančių atitinkamų funkcijos reikšmių santykiai yra beveik pastovūs, tai funkcijos priklausomybė nuo šio argumento išreiškiama eksponentiniu dėsniu. Lentelėje pateiktos y reikšmės būtent ir auga maždaug 1,4 santykiu; šis pastovumas ir patvirtina minėtą sąryšį.

P2.1 lentelė. **Eksponentinio sąryšio vienodų santykių patikrinimas**

x	2		4		6		8		10
y	0,8		1,2		1,6		2,2		3
Gretimų y verčių santykiai		1,5		1,3		1,4		1,4	

Sąryšių grafikai

Dydžių priklausomumui patikrinti labai patogu atvaizduoti jų grafikus. Žiūrint į grafiką nesunku nustatyti, ar koks nors sąryšis tenkinamas, ar ne. P2.1 pav. pateikta įvairių sąryšių matematinės išraiškos ir atitinkami grafikai.

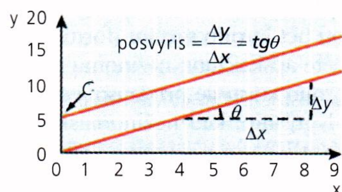
Grafike įprasta horizontaliojoje ašyje x atidėti **nepriklausomąjį** kintamąjį, o vertikaliojoje ašyje y – **funkciją**. Pavyzdžiui, greitėjančio automobilio *greitis* auga visą *laiką*, kol jį veikia greitinančioji jėga. Tokiu atveju įprasta laiką apibrėžti kaip nepriklausomą kintamąjį, o greitį – kaip funkciją.

Fizikoje kartais šios taisyklės nepaisoma. Pavyzdžiui, tamprus kūnas, paveiktas jėga, deformuojasi. Ta deformacija gali būti įvertinama kaip jo matmenų pasikeitimas, priklausomas nuo panaudotos jėgos dydžio. Tačiau įprasta x ašyje atidėti funkciją, t. y. *matmenų pasikeitimą*, o y ašyje – nepriklausomąjį kintamąjį, t. y. *jėgą*. Taip įprasta nuo seno įsigalėjus nuostatai, kad jėga išreiškiama per pailgėjimą, o ne atvirkščiai:

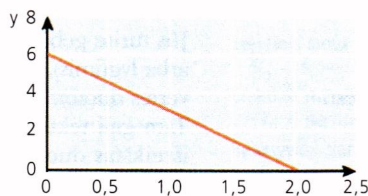
Jėga = konstanta × deformacija

O ši konstanta, kaip paaiškinta toliau, rodo kreivės *posvyrį*.

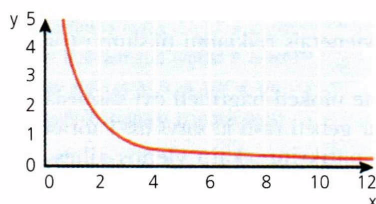
P2.1 pav.



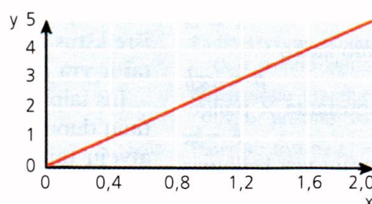
a) Funkcijų $y = mx$ ir $y' = mx + c$ grafikai



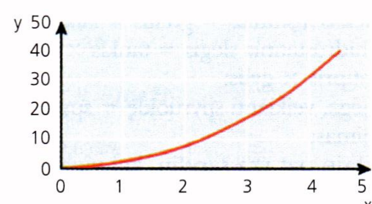
b) Neigiamo posvyrio funkcijos $y = -3x + 6$ grafikas



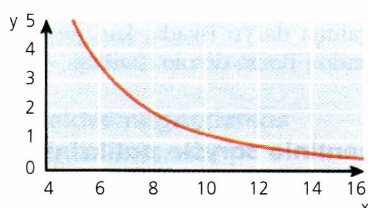
c) Atvirkštinis sąryšis $xy = k$; y pavaizduotas kaip x funkcija



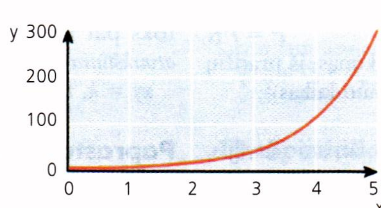
d) Atvirkštinis sąryšis $xy = k$; y pavaizduotas kaip $1/x$ funkcija



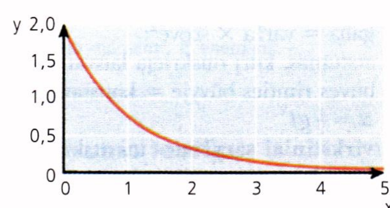
e) Funkcijos $y = kx^2$ grafikas ($k = 2$)



f) Atvirkštinių kvadratų sąryšis $y = k/x^2$



g) Eksponentinis augimas: $y = ke^x$



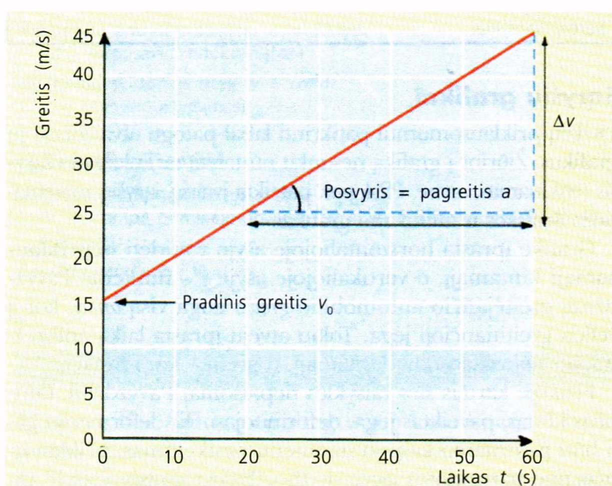
h) Eksponentinis mažėjimas: $y = 2e^{-x}$

Posvyris ir liestinė

Greitis, kuriuo tam tikras dydis kinta kintant argumentui, yra lygus grafiko kreivės **posvyriui** (arba jos tangentui, arba gradientui). Tiesę atitinka formulė:

$y = mx + c$

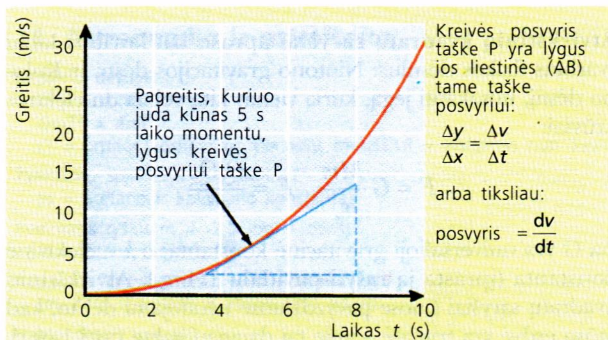
čia m yra kreivės posvyris, o c – jos sankirtos su y ašimi taškas. Tiesė kerta y ašį, kai $x = 0$, taigi ir iš formulės aišku, kad tame taške $y = c$.



P2.2 pav. **Posvyris ir sankirta: greitėjančiojo judėjimo grafikas**

Tai iliustruoja P2.2 pav., kur y ašyje atidėtas greitis, o x ašyje – laikas. Tiesės posvyris, rodantis greičio kitimo greitį, t. y. pagreitį, yra *pastovus*. Jos sankirta su y ašimi taškas rodo pradinį greitį, t. y. greitį laiko momentu $t = 0$.

P2.3 pav. parodyta, kaip rasti sudėtingesnio grafiko, kuris nėra paprasta tiesės atkarpa, posvyrį. Jį atitinka kreivės liestinė tame taške.



P2.3 pav. **Kreivės liestinės brėžimas**

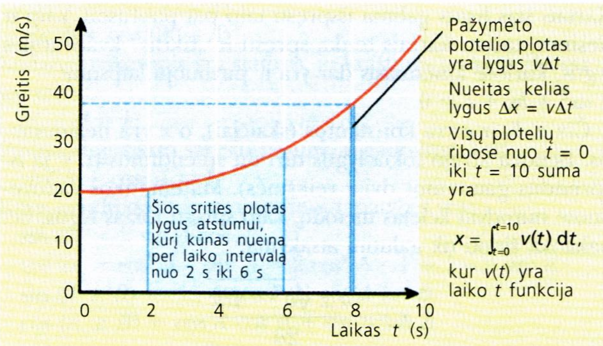
Grafiko kreivės ribojamas plotas

Grafiko kreivės ribojamos, srities plotas atitinka dydį, kurį gauname daugindami du kintamuosius. Šis teiginys galioja net ir tuo atveju, kai abu jie tolygiai kinta. Matematiškai ši sritis apibrėžiama kaip funkcijos *integralas* kintamojo atžvilgiu, kaip parodyta P2.4 pav.

Kreivių atvaizdavimas tiesiniais grafikais

Priklausomybės $y = ax^2$ grafikas yra kreivė. Jei nagrinėsime ją kaip y priklausomybę nuo x^2, gausime tiesę, kurios posvyris lygus a. Tai labai naudingas būdas patikrinti, ar kokia nors priklausomybė atitinka laipsninį sąryšį, ir rasti konstantą a.

Jei nežinote, kaip vienas kokių nors reikšmių rinkinys (y) yra susijęs su kitu (x), bet numanote, kad tas sąryšis gali bū-



P2.4 pav. **Sritis po grafiku; jos prasmė**

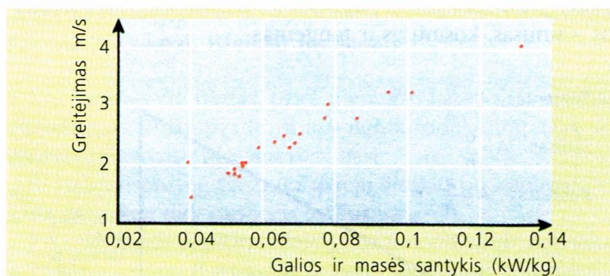
ti pavidalo $y = ax^n$, gali labai pagelbėti log y priklausomybės nuo log x grafikas, nes tokia priklausomybė gali būti pateikiama šitaip:

$$\log y = \log a + n \log x,$$

o tai tiesinė priklausomybė; jos posvyris n, o y ašį ji kerta taške log a.

Sklaidos grafikai

Duomenis ne visada galima pavaizduoti tiksliais ar paprastais matematiniais sąryšiais. Kai vienas kintamasis atvaizduojamas kaip kito funkcija, taškai grafike gali būti išsisklaidę tikslią priklausomybę žyminčios tiesės arba kreivės aplinkoje. Tokiu atveju galima kalbėti tik apie **didžiausio artutinumo kreivę**, kuri yra charakteristikos, aprašomos tuo grafiku, modelis. Jei duomenys yra per daug išsisklaidę, tai kartais netgi neįmanoma teigti, jog juos sieja koks paprastas dėsnis ar sąryšis. Tokie atvejai būdingi tiriant labai sudėtingus objektus, tarkime, biologinius, tačiau ir tada galima panaudoti matematinės statistikos metodą, įgalinantį patikrinti tokių modelių patikimumą. Kaip tai padaroma, buvo aptarta kai kuriose duomenų analizės užduotyse.



P2.5 pav. **Grafikas, demonstruojantis pasiskirstymą, kaip 21 rūšies automobiliai tenkina Niutono dėsnius**

3. Matematinis įrodymas

Jūs turite mokėti įrodyti kai kurias priklausomybes, išplaukiančias iš pagrindinių apibrėžimų, pavyzdžiui:

a) išvesti įcentrinio pagreičio išraišką v^2/r iš pagreičio, kaip greičio kitimo greičio, apibrėžimo,

b) gauti gravitacinio potencialo formulę $-GM/r$ naudojantis darbo apibrėžimu ir atvirkštinio kvadrato dėsniu,

c) rasti sukauptos kondensatoriuje energijos dydį $E = \frac{1}{2}QV = \frac{1}{2}CV^2$ nagrinėjant plotą įtampos ir krūvio tarpusavio priklausomybės grafike,

d) gauti kinetinės energijos formulę $pV = \frac{1}{3}Nm\overline{c^2}$ naudojantis judesio kiekio tvermės dėsniu ir slėgio apibrėžimu.

Egzaminų ir testų metu gal ir neprireiks išvedinėti šių formulių, tačiau jas visada naudinga žinoti.

4. Tyrinėjimai remiantis matematika: matematiniai modeliai

Įprasta, kad fizikai, modeliuodami „realų gyvenimą“, naudojasi įvairiomis prielaidomis, tokiomis kaip trinties nebuvimas, tobulų sferų egzistavimas, tolygiai pasiskirsčiusi masė ir pan. Be to, prognozuojant tai, kas galėtų atsitikti, atliekami gana sudėtingi matematiniai skaičiavimai. Atlikus visus veiksmus gaunamas modelis, kuris, jei pasiseka, gali būti artimas realybei, leisti daryti įvairias prognozes ir geriau suprasti sudėtingus procesus.

Naudingiausias ir dažniausiai naudojamas šiems tikslams matematinis metodas yra **matematinė analizė**, naudota dar I. Niutono ir kitų darbuose. Niutonui šio metodo prisireikė norint nustatyti judėjimo ir gravitacijos dėsnius. Matematinė analizė dar ir dabar yra viena efektingiausių matematinio modeliavimo priemonių. 345 p. pateiktas svarbiausių matematinės analizės formulių sąvadas.

Pastaruoju metu vis populiaresnis tampa matematinis modeliavimas, pagrįstas **skaitmeniniais metodais**, praktiškai atliekamais kompiuteriu (dinaminėmis duomenų lentelėmis, arba skaičiuoklėmis). Naudojantis šiuo metodu galima keisti sąlygas, t. y. įvairias konstantas bei kintamuosius ir labai greitai bei paprastai įvertinti šių pokyčių poveikį, kadangi visą „juodą“ darbą šiuo atveju atlieka elektronika. Šios programos turi daug bendra, tačiau šiek tiek skirtingai vykdomos. Pateiksime keletą naudingų patarimų, kaip jomis naudotis.

Žinomi bent trys pagrindiniai jų naudojimo būdai:

1. Įvesti ir saugoti eksperimentų duomenis bei braižyti grafikus. Pavyzdžiai: duomenų apie automobilių savybes tyrimas, eksperimentų rezultatai.

2. Naudotis anksčiau jau išvestomis formulėmis su kokiais nors duomenimis ir konstantomis, kad būtų galima patikrinti, kas atsitinka, kai tie duomenys ir/ar konstantos pakinta. Iš esmės visa matematinė fizika yra sukurta išvedinėjant kokias nors formules. Pavyzdžiai: judėjimo lygčių panaudojimas, sviedinių skriejimo aprašymas atsižvelgiant į įvairius jų greičius ir oro pasipriešinimą, paprasto harmoninio judėjimo tyrimas, įvairaus dažnio garso bangų superpozicijų tyrimai.

3. Modeliams taikyti skaitmeninius metodus, paremtus paprastais apibrėžimais. Tokiu atveju netenka išvedinėti jokių sudėtingų lygčių, nes pakanka pakartoti skaičiavimus mažais žingsneliais (iteracijomis). Pavyzdžiai: radioaktyviojo skilimo modeliavimas, kondensatoriaus iškrova, gravitacinis planetos potencialas, raketų judėjimas. (Prisiminkite 1-os d. 2 ir 4 skyrių užduotis).

Panagrinėkite pavyzdžius, pateiktus 346 p.

Patarimai atliekant skaičiavimus

Laipsniai ir laipsnio rodikliai

Jeigu $x = a^y$, tai $y = \log ax$,
pavyzdžiui $x = 10^3$, $\log_{10}x = 3$
$x = e^4$ $\log_e x = \ln x = 4$

P2.2 lentelė. **Laipsniai, indeksai ir priešdėliai**

Daugiklis	Priešdėlis	Simbolis	Daugiklis	Priešdėlis	Simbolis
10^{-1}	deci	d	10^{1}	deka	da*
10^{-2}	centi	c	10^{2}	hekto	h*
10^{-3}	mili	m	10^{3}	kilo	k
10^{-6}	mikro	m	10^{6}	mega	M
10^{-9}	nano	n	10^{9}	giga	G
10^{-12}	piko	p	10^{12}	tera	T
10^{-15}	femto	f	10^{15}	peta	P*
10^{-18}	atto	a	10^{18}	eksa	E*

* vartojamas retai

Fizikoje vartojami standartiniai dešimties laipsnių žymėjimai, tokie kaip:

542,3 rašomas kaip $5,423 \times 10^2$

0,05423 rašomas kaip $5,423 \times 10^{-2}$

Čia ^{2} ir $^{-2}$ yra **laipsnio rodikliai**.

Kompiuteriuose ir skaičiuokliuose kartais naudojamas standartinis laipsnio rodiklis su raide E, po kurios nurodomas dešimties laipsnio rodiklis, t. y. skaičiai juose pateikiami taip:

5,423E2 arba 5,423E–2

Galutinį atsakymą ir rezultatus visada reikia pateikti standartiniu pavidalu. Ypač reikia atidžiai skaičiuokliui nurodyti skaičius, nes kartais klavišas, kurį spaudžiate, nereiškia tiesiogiai to, ką jūs norite užrašyti. Pavyzdžiui, norint pateikti skaičiuokliui skaičių 5,423E2, tenka paspausti tokius klavišus:

1 žingsnis **5,423**

2 žingsnis **EXP** (laipsnio rodiklio klavišas)

3 žingsnis **2**

Kitais žodžiais tariant, jei tarp 1 ir 2 žingsnių paspausite klavišus × 10, rezultatas bus dešimt kartų didesnis, nei tikėjotės. Pabandykite patikrinti.

Daugінant skaičius, išreikštus dešimties laipsniais, laipsnių rodikliai **sumuojami**:

$3 \times 10^4 \times 2 \times 10^5 = 6 \times 10^9$

$3 \times 10^4 \times 2 \times 10^{-5} = 6 \times 10^{-1}$

Apskritai paėmus, $a^5 \times a^2 = a^7$ arba $a^m \times a^n = a^{(m+n)}$.

Dalijant laipsnių rodikliai **atimami**:

$3 \times 10^4 / 2 \times 10^5 = 1,5 \times 10^{-1}$

$3 \times 10^4 / 2 \times 10^{-5} = 1,5 \times 10^9$

Reikia taip pat prisiminti, kad:

$10^2 = 100$, $10^1 = 10$, $10^{-1} = 1/10 = 0,1$ ir

$10^{-2} = 1/10^2 = 1/100 = 0,01$

Kaip jau tikriausiai pastebėjote, šioje sekoje dingo 10^0. Taip, jis lygus vienetui, todėl ir nėra rašomas. Bendra pastaba: bet koks skaičius, pakeltas laipsniu, lygiu nuliui, tampa lygus vienetui. Pabandykite tuo įsitikinti daugindami a^2 iš a^{-2}.

Algebra: lygčių pertvarkymas ir sprendimas

Tiesinėse lygtyse nėra kintamųjų („nežinomųjų“), kurių laipsnis nelygus vienetui, pavyzdžiui:

$v = u + at \quad V = IR \quad F = ma$

Norint rasti nežinomojo vertę, reikia pasinaudoti žinomomis visų kitų kintamųjų vertėmis, pavyzdžiui, pateiktame pavyzdyje, jei duota $u = 0$ m/s, $a = 9,8$ m/s^2 ir $t = 10$ s, tai greičio reikšmė

$v = 0 + 9 \times 10 = 98 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Jeigu reikia rasti, kiek laiko truks pradėjus kristi iš rimties būsenos kūnui, kol pasieks 98 m/s greitį, tenka pertvarkyti formulę taip, kad duotais dydžiais būtų išreikštas nežinomasis t. Tai atliekama pasinaudojus elementariais formulių pertvarkymais:

1. perkėlus u į kitą lygties pusę ir pakeitus ženklą: $v - u = at$

2. tai galima pateikti ir tokiu pavidalu: $at = v - u$

3. abi puses padalijus iš a: $t = (v - u)/a$

4. ir įrašius duotas vertes: $t = (98 - 0)/9,8 = 10$ s.

Kvadratinėse lygtyse kintamasis būna pakeltas kvadratu. Paprasčiausi tokių lygčių pavyzdžiai yra:

$$E = \tfrac{1}{2}mv^2$$

$$v^2 = u^2 + 2as$$

Kartais šias lygtis galima išspręsti taip pat paprastai, kaip ir tiesines, tačiau kartais tenka spręsti ir „tikras“ kvadratines lygtis, kuriose kintamasis dar yra ir pirmuoju laipsniu:

$ax^2 + bx + c = 0$

Čia a, b, ir c yra konstantos (skaičiai), o x yra nežinomasis. Bendru atveju tokia lygtis turi du sprendinius (t. y. ją išsprendus gaunamos dvi x reikšmės). Matematikos vadovėliuose nurodyta keletas metodų, kaip spręsti tokias lygtis, bet pakanka žinoti tik galutinį atsakymą:

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

PAVYZDYS

K Kūnas ore metamas vertikaliai aukštyn, suteikiant jam greitį, lygų 20 m/s. Naudodamiesi formule $s = ut + \frac{1}{2}at^2$ raskite, po kiek laiko jis pakils į 10 metrų aukštį. Pasinaudokite tuo, kad $a = -9,8$ m/s^2.

A Įrašę į duotą lygtį visus skaičius ir ją pertvarkę gauname:

$4,9t^2 - 20t + 10 = 0$

Pasinaudoję sprendinio formule gauname:

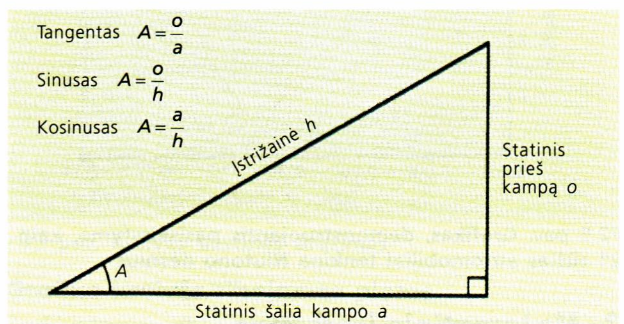
$$x = \frac{+20 \pm \sqrt{400 - (4 \times 4,9 \times 10)}}{2 \times 4,9}$$

$$= \frac{20 \pm \sqrt{204}}{9,8}$$

Taigi lygtis turi du sprendinius: t = 3,5 s ir 0,58 s. Abu jie teisingi – kūnas būna 10 m aukštyje po 0,58 s, kai kyla aukštyn, ir po 3,5 s – leisdamasis žemyn.

Trigonometrija

P2.6 pav. parodyta, kokiais stačiojo trikampio kraštinių santykiais yra išreiškiamos pagrindinės trigonometrinės funkcijos – sinusas, kosinusas ir tangentas.



P2.6 pav. Trigonometriniai santykiai

Kartais dar sutinkamos ir atvirkštinės šioms trigonometrinėms funkcijoms – kosekantas, sekantas ir kotangentas:

cosec $A = 1/\sin A$ sec $A = 1/\cos A$ ctg A $1/\text{tg } A$

Nesupainiokite jų su atvirkštinėmis trigonometrinėmis funkcijomis arksinusu, arkkosinusu ir arktangentu, kurios skaičiuokliuose kartais žymimos kaip

sin(–1) n; jis reiškia *kampą, kurio sinusas lygus n*

cos(–1) n; jis reiškia *kampą, kurio kosinusas lygus n*

tan(–1) n; jis reiškia *kampą, kurio tangentas lygus n*

Pažvelgę į trikampį, pateiktą P2.6 pav., galite nesunkiai suprasti, kad

$\sin A = \cos(90 - A)$

$\cos A = \sin (90 - A)$

$\cot A = \cos (90 - A)$

Kadangi trikampis yra statusis, jo kraštinės tenkina Pitagoro teoremą:

$a^2 + o^2 = h^2$

Pasinaudojus šiuo sąryšiu nesunkiai gauname, kad

$\sin^2 A + \cos^2 A = 1$

Kitos naudingos trigonometrinės tapatybės yra:

$\sin 2A = 2 \sin A \cos A$

$\cos 2A = \cos^2 A - \sin^2 A = 2 \cos^2 A - 1 = 1 - 2 \sin^2 A$

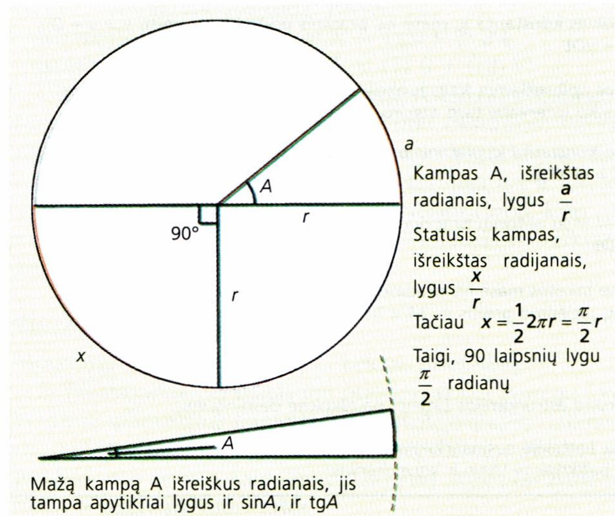
$\sin (A \pm B) = \sin A \cos B \pm \cos A \sin B$

$\cos (A \pm B) = \cos A \cos B \mp \sin A \sin B$

Radianai ir mažų kampų artutinumai

Radianas yra kampų matavimo vienetas, paremtas apskritimo savybėmis, toks, kad:

kampas, išreikštas radianais, lygus apskritimo lanko, apriboto to kampo kraštinėmis, ilgio santykiui su apskritimo spinduliu



Pav. A2.7 **Kampai, išreikšti radijanais**

Kai kampas yra mažas, prieš jį esančio lanko ilgis artimas atitinkamos trikampio kraštinės ilgiui, todėl kampas A, išreikštas radianais, lygus $\sin A = \text{tg } A$

Ši priklausomybė tiksli iki dviejų ženklų po kablelio, jei kampas yra ne didesnis kaip 5 laipsniai.

PATARIMAS: Skaičiuokliais galima naudotis ir laipsnių, ir radianų režimu (kartais net ir neįprasta mums amerikietiška laipsnių sistema). Taigi, naudodami skaičiuoklį skaičiavimams, kuriuose naudojamos trigonometrinės funkcijos, atidžiai pasirinkite deramą argumentų pasirinkimo režimą.

Naudingos matematinės analizės formulės

Išvestinės randamos **diferencijuojant** funkciją.

P2.3 lentelė. **Išvestinės**

y	x^n	sin x	cos x	tg x	ctg x	cosec x	e^{kx}	ln x	ln kx
dy/dx	nx^{n-1}	cos x	−sin x	sec² x	−cosec² x	−cosec x ctg x	ke^{kx}	$1/x$	$1/x$

Integralai

Kalbėsime tik apie neapibrėžtinius integralus, taigi kiekvienoje išraiškoje dešinėje pusėje pridėjus bet kokią konstantą, rezultatas irgi turi būti teisingas.

f(x) (**argumento x funkcija**)	$\int$ **f(x) dx**
x^n	$\frac{x^{n+1}}{n+1}$, išskyrus atvejį $n = -1$
$\frac{1}{x}$	$\ln x$
e^x	e^x
a^x	$\frac{a^x}{\ln a}$
$\frac{1}{\sqrt{a^2 - x^2}}$	$\sin^{-1} \frac{x}{a}$

Argumento x funkcijų dėsnių diferencijavimas ir integravimas

Pastaba: Išvestinę žymėsime ženkleliu ', taigi:

$u = f(x) \quad u' = du/dx$

$v = f(x) \quad v' = dv/dx$

Naudojant šį išvestinių žymėjimo būdą, pagrindinius rezultatus galima pateikti taip:

$(uv)' = u'v + uv'$

$$(uv)' = u'v' + uv'$$

$$\left(\frac{u}{v}\right)' = \frac{u'v - uv'}{v^2}$$

$$\int uv' dx = uv - \int u'v\, dx$$

Dinaminių duomenų lentelių naudojimas fizikoje

Dinaminių duomenų lentelės – tai kompiuterinės programos, kuriomis galima tvarkyti didelius duomenų masyvus ir piešti įvairiausius grafikus. Jose ne tik sutelktos įvairios matematinės ir statistinės formulės, bet jos dar ir pritaikytos skaičiavimams pagal jūsų pateiktąsias. Veiksmai sparčiai atliekami su sudėtingiausiomis lygtimis.

Pasirinkus formulę (ar formules) dinaminių duomenų lentelės gali per keletą sekundžių atlikti šimtus skaičiavimų ir nubraižyti įvairiausius grafikus. Jūs taip pat galite pakeisti formulėse kai kurias konstantas ar kintamųjų reikšmes ir tuoj pat gauti atitinkamus funkcijų pokyčius grafikuose.

Duomenys dinaminėse lentelėse įrašomi į reikiamus langelius (ląsteles), sužymėtus raidėmis (kiekviena raidė žymi stulpelį) ir skaičiais (skaičiai žymi eilutes).

Pastaruoju metu įsigalėjo universali (standartinė) dinaminių duomenų lentelių, jų simbolių ir duomenų pateikimo tvarka. Pirmiausia, didžiosiomis raidėmis žymimi kintamieji, pavyzdžiui, dydis D gali būti pažymėtas raide D, skaičius π – raidėmis PI arba PI().

= įveda jums reikalingą formulę, pavyzdžiui,

= B6 + C6 yra formulė, rodanti, kad duomenų lentelės langelyje B6 esantis skaičius turi būti sumuojamas su langelyje C esančiu skaičiumi;

* reiškia daugybą, taigi 23 sandauga su 42 žymima kaip 23*42;

^ reiškia laipsnio rodiklį, tai yra 3^2 rašoma kaip 3Ł2;

E žymi dešimties laipsnio rodiklį, taigi 5×10^4 žymimas kaip 5E4; galima žymėti taip pat ir kaip 5*10^4;

/ reiškia dalybą, pavyzdžiui, 4/3 lygu keturioms trečiosioms.

Dinaminių duomenų lentelių panaudojimo pavyzdžiai

A. Duomenų tvarkymas

Tai eksperimentų duomenų įrašymas į lenteles, jų išdėstymas tam tikra tvarka, grafikų ir diagramų braižymas, taip pat vidurkių, nuokrypių ir priklausomybių skaičiavimas.

B Modeliavimas

Tirdami, kaip elgsis jūsų modeliuojami dydžiai kintant argumentams, jūs galite naudotis standartinėmis lygtimis ir formulėmis arba savo sukurtais modeliais.

Pirmuoju atveju jums tereikia tik pasinaudoti kitų atlikto darbo rezultatais. Antruoju atveju tai atlieka dinaminės lentelės programa, kuri akimirksniu apdoroja pateiktus duomenis, ir jūs gaunate reikiamus modelius ir rezultatus. Abiejų atvejų pavyzdžiai, taip pat pagrindinės formulės, apibrėžimai ir kai kurios vertingos rekomendacijos yra pateiktos lentelėje.

Modelis	Patarimai ir formulės
1. Greitėjantis judėjimas	v = v + Dv, Dv = vDt, s = s + Ds, Ds = vDt
2. Judėjimas tolygiame gravitaciniame lauke	g = 9,8, Dv = gDt, v = v + Dv, vidutinis greitis = (v' + v)/2
3. Sviedinio judėjimas esant oro pasipriešinimui	Išplėskite 2 modelį. Parinkite kampo vertę A ir pradinį greitį V; vertikalioji greičio dedamoji = V sin(A), horizontalioji = V cos(A), vertikalusis pagreitis lygus –g. Skaičiuokite vertikaliąją ir horizontaliąją koordinates (aukštį ir atstumą). Pateikite grafikus.
4. Paprastas harmoninis judėjimas veikiant jėgai (horizontalioji spyruoklė)	Reikalingi duomenys: spyruoklės konstanta k, masė m, pradinis poslinkis x; greitis v = v + Dv, a = –kx/m, Dv = aDt, x = x + vDt
5. Pulsacijos	Pateikite dviejų bangų, kurios apibrėžiamos kaip funkcijos sin(2PIft), sumos grafikus; bangų dažniai lygūs 4 Hz ir 6 Hz, laiko intervalai tarp atskirų taškų – 0,005 s.
6. Radioaktyvusis skilimas	Reikalingi duomenys: skilimo konstanta k, pradinis branduolių skaičius N, pakankamas laiko intervalas. N = N + DN, DN = –kNDt.
7. Radioaktyvusis skilimas su skilimo produktais	Tas pats kas anksčiau, bet dar ir su antriniu branduoliu B (jo pradinis kiekis lygus nuliui), kurio konstanta b, DB = DN – bBDt.
8. Raketos	Reikalingi duomenys: pradinė raketos masė M, pradinis raketos greitis V, degimo produktų išmetimo greitis R (kg/s) ir jų judėjimo greitis v; M = M – DM, DM = RDt, V = V + DV, DV = vDM/M.
9. Kondensatoriaus įkrova ir iškrova	
10. Planetų duomenų analizė	Pasirinkite duomenis iš bet kurio astronomijos žinyno; paieškokite dėsningumų.
11. Karštojo kūno spinduliuotė: Planko konstanta	Raskite pagrindinę konstantą, lentelėje pasinaudokite eksponentine funkcija. Nustatykite temperatūros kitimo efektą, patikrinkite Vyno ir kitus dėsnius.

3 PRIEDAS: TYRIMAI IR EKSPERIMENTAI

Kam reikalingi eksperimentai?

Yra keletas priežasčių, kodėl mokantis fizikos reikia atlikti praktinius laboratorinius darbus. Jas galima apibendrinti tokiais keturiais tikslais:

1. Praktiniai užsiėmimai padeda geriau suprasti fiziką, nes abstrakčias idėjas perkelia į realybę.

2. Jų metu įtvirtinami formuoja saugaus darbo su įvairiais prietaisais įgūdžiai bei …

3. … išmokstama naudotis prietaisais ir gauti kuo tikslesnius matavimų rezultatus.

4. Atliekant eksperimentus taip pat lavinami bendresni įgūdžiai kaip suplanuoti tyrimą, jį atlikti ir įvertinti jo rezultatus.

Praktiniai darbai padeda suprasti fiziką ir įgalina gauti geresnius pažymius. Antrasis tikslas yra svarbus bet kokiems laboratoriniams darbams: saugumas yra akivaizdus reikalavimas; jūs turite mokėti įvertinti kiekvienos praktinės procedūros *rizikos laipsnį* – apie tai klauskite savo mokytojo. Trečiasis tikslas taip pat yra labai svarbus: blogi rezultatai sudaro sąlygas kilti klaidinančioms idėjoms, be to, dėl blogų įgūdžių nukenčia darbo saugumas.

Ketvirtasis tikslas yra trijų pirmųjų apibendrinimas ir, kas labai svarbu, padeda įvertinti jūsų teorinį pasirengimą, gebėjimą prognozuoti tyrimo rezultatus remiantis teorija, t.y. moko jus daryti pagrįstus spėjimus arba **hipotezes**.

Jei norite patikrinti hipotezę ir tam numatyti eksperimentą, turite turėti pakankamai žinių apie tam tikrų dydžių matavimams skirtus prietaisus bei mokėti jais naudotis. Tik tuomet jūs atliksite tinkamus ir patikimus matavimus. Taip pat turite mokėti palyginti matavimų rezultatus su pradiniu modeliu: ar rezultatai patvirtina hipotezę.

Galimų laboratorinių užduočių sąrašas pateiktas 350–352 puslapiuose. Užduotys suskirstytos į tris pagrindines kategorijas:

A. Demonstracinės ir mokomosios užduotys. Šio tipo užduočių tikslas – padaryti abstrakčias idėjas labiau suprantamas, parodyti, kaip jos atrodo realybėje.

B. Matavimo užduotys. Atlikdami šio tipo užduotis turėtumėte pasiekti ne tik užsibrėžtus tikslus, bet ir išmokti naudotis svarbiausiais matavimo prietaisais bei metodais. Šių užduočių metu turėtumėte pajusti įvairių fizikinių dydžių verčių kitimo ribas.

C. Tyrimai. Šių darbų metu atsiskleidžia jūsų gebėjimas vykdyti eksperimentus, galite savarankiškai patikrinti savo hipotezes ar modelius.

Eksperimentų tikslumas

Visuose eksperimentuose tenka spręsti dilemą tarp gaunamo tikslumo ir matavimų patikimumo bei laiko ir pastangų, reikalingų tiems rezultatams gauti. Matavimų tikslumas turi būti pakankamas, kad būtų pasiektas užsibrėžtas tikslas, todėl planuodami eksperimentą ar tyrimą jūs privalote apgalvoti:

- matuojamo kintamojo kitimo ribas (jis turi atitikti matavimo galimybes, t.y. būti nei labai didelis, nei per mažas).
- matavimų skaičių (jis turi būti pakankamas, kad per matavimams skirtą laiką būtų pasiektas reikiamas rezultatų patikimumas);
- reikiamą kiekvieno matavimo tikslumą (jis turi būti pakankamas tikslui pasiekti).
- ar reikia kai kuriuos matavimus arba jų sekas pakartoti.

Visi matavimai yra netikslūs

Mes galime išmatuoti ar įvertinti matavimo tikslumą „santykine (procentine) paklaida" arba rezultato vertės „neapibrėžtumu" – absoliutine paklaida. Pavyzdžiui:

įtampos kritimas rezistoriuje $R = 11{,}0\ \text{V} \pm 2\%$

įtampos kritimas rezistoriuje $R = (11{,}0 \pm 0{,}2)\ \text{V}$

Užrašant išmatuotą vertę, pateikiamų reikšminių skaitmenų turi būti tiek, kiek jų leidžia matavimo tikslumas. Pavyzdžiui, jeigu skaitmeninis voltmetras rodo 11,025 V, tai taip užrašyti matavimo rezultatą gali būti klaidinga net ir tuo atveju, jeigu tai atitinka tikrąją įtampą. Norint žinoti, kaip užrašyti matavimų rezultatus, reikia pirmiausia išsiaiškinti, koks yra matavimo tikslumas.

Tikslumo įvertinimas

Matavimų netikslumus sąlygoja keletas priežasčių:

1) Jie atsiranda dėl matavimo prietaiso skalės žymenų (pavyzdžiui, milimetrine liniuote, kurios skalėje atidėti milimetrai, galima išmatuoti daugių daugiausia 0,2 mm tikslumu – priklausomai nuo to, kaip gerai mato jūsų akys, nuo žymenų storio ir skalės padalos vertės).

2) Tai gali būti sunkiai matuojamas nuo terpės neatskiriamas dydis, pavyzdžiui, garso greitis atvirame ore ar vandens slėgis čiaupe.

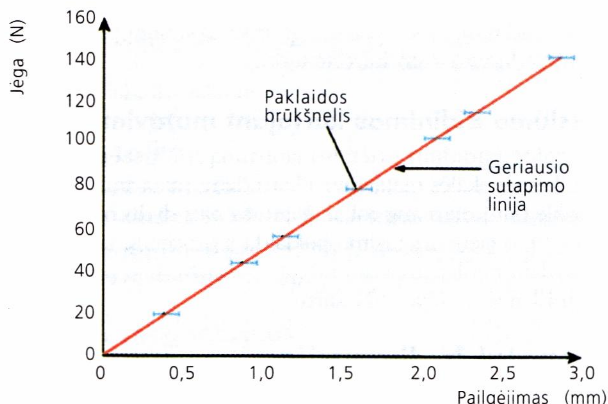
3) Žmogus taip pat yra paklaidų šaltinis: jo reakcijos laikas ribotas (pavyzdžiui, sekundometru nustatant kūno kritimo laiką arba svyravimų periodą); rodmenų atskaita žiūrint į skalę kampu gali būti netiksli.

4) Svarbi ir kitų veiksnių įtaka, pavyzdžiui, „sistemos triukšmai", kurių amplitudė yra maždaug tokia pat kaip ir matuojamas dydis (pavyzdžiui, dviejų masių gravitacijos jėga, Holo įtampa puslaidininkiniame bandinyje).

Kalibravimo paklaidos atsiranda dėl skalės netikslumų, dažniausiai dėl to, kad netiksliai nustatyta nulinė padėtis (pavyzdžiui, termometras, kurio 0 °C yra ne ties vandens kristalizacijos tašku).

Kalibravimo paklaidas galima pastebėti jau tada, kai apžiūrimas matavimams naudotas prietaisas. Kitų priežasčių sukelti netikslumai išryškėja tik analizuojant sukauptus duomenis, pavyzdžiui, gauti rezultatai yra išsisklaidę tam tikrame diapazone, ypač tai gerai matyti atidėjus rezultatus grafike, kuris turi atitikti prognozuojamą kreivę. Paprastai netikslumus sukelia ne vienos, o kelių rūšių priežastys.

P3.1 paveiksle pateikta vielos pailgėjimo priklausomybė nuo ją tempiančios jėgos stiprio. Kiekvieno matavimo rezultatas (vielos pailgėjimas) pažymėtas brūkšneliu – brūkšnelio ilgis atitinka įvertintą matavimo paklaidą (netikslumą). Teoriškai pailgėjimas priklauso nuo veikiančios jėgos tiesiškai, tačiau paveiksle matyti, kad matavimų rezultatai negali būti tikslai sutapatinti su jokia tiese. Nubrėžta linija vadinama „geriausio sutapimo linija". Nors šiame paveiksle ji nubrėžta „iš akies", tačiau skaičiuoklė pagal matavimų duomenis gali nubrėžti kompiuterio ekrane tikslią geriausio sutapimo liniją.



P.3.1 pav. **Vielos pailgėjimo priklausomybė nuo tempimo jėgos. Pažymėti brūkšneliai rodo spėjamą matavimo paklaidą.**

Pilnosios paklaidos įvertinimas

P3.1 paveikslе pateikta vielos pailgėjimo priklausomybė nuo tempimo jėgos gali būti panaudota metalo, iš kurio padaryta viela, Jungo moduliui apskaičiuoti. Formulė yra tokia:

E = įtempimas / santykinis pailgėjimas =

$$\frac{\Delta F}{A}\frac{L}{\Delta x} = \frac{L}{\pi r^2}\frac{\Delta F}{\Delta L}$$

čia A yra vielos skerspjūvio plotas (πr^2, kur r yra vielos spindulys). Vielos spindulys, išmatuotas sukamuoju mikrometru, lygus $(0{,}32 \pm 0{,}01)$ mm. L yra neištemptos vielos ilgis, lygus $(1{,}225 \pm 0{,}02)$ m. Naudodamiesi grafiku, galime rasti jėgos ir pailgėjimo sąryšį atitinkančios tiesės posvyrį, $\Delta F/\Delta L$:

$100\ \text{N}/2{,}0\ \text{mm} = 5{,}0 \times 10^4\ \text{N} \cdot \text{m}^{-1}$.

Tiesės posvyrio netikslumą sąlygoja keletas veiksnių: prietaisų matavimo paklaida, pačios vielos elgesio neapibrėžtumas ir tikriausiai šioks toks poslinkis svarsčių sistemoje, kai papildomai prikabinami didelės masės svoriai. Posvyrio netikslumą galime nustatyti brėždami mažiausiai ir daugiausiai pasvirusias tieses. Tai atlikę gauname:

posvyris = $\Delta F/\Delta L = (5{,}0 \pm 0{,}4) \times 10^4\ \text{N} \cdot \text{m}^{-1}$.

Žinodami r, L ir $\Delta F/\Delta L$, apskaičiuojame E. *Galutinio rezultato netikslumą sąlygoja visų į formulę įeinančių kintamųjų neapibrėžtumai* (P3.1 lentelė).

P3.1 lentelė

Dydis	*l*	r	r	Δ*F*/Δ*l*
Vertė	1,25 m	0,32 m	0,32 m	$5{,}0 \times 10^4\ \text{N} \cdot \text{m}^{-1}$
netikslumas %	0,2	3	3	4

Bendras dydžio E santykinis netikslumas yra apie 10%. Atkreipkite dėmesį, kad dydis r formulėje įrašytas du kartus, nes $r^2 = r \times r$.

Pagal turimus duomenis apskaičiavę E reikšmę, gauname keturių reikšminių skaitmenų dydį $1{,}943 \times 10^{-11}$. Kiek jų reikia įrašyti į atsakymą? 10% netikslumas yra apie $0{,}2 \times 10^{-11}$ Pa. Tiek skaitmenų ir reikia pateikti galutiniame eksperimento rezultate: $E = (1{,}9 \times 0{,}2) \times 10^{-11}$ Pa.

Kritinio matavimo paieška

Kai išmoksite įvertinti laboratorinių matavimų rezultatų paklaidas, tai pastebėsite ir dydžius, kurių paklaidos įtaka galutiniam rezultatui yra didžiausia. Aprašyto eksperimento atveju kritinis dydis yra r. Taip yra ne tiek dėl to, kad sudėtinga išmatuoti vielos spindulį, kiek dėl to, kad šis dydis į galutinę formulę įeina du kartus, todėl jis sukelia dvigubą netikslumą. Vadinasi, reikia pasistengti rasti tikslesnių prietaisų arba metodų vielos storiui išmatuoti.

Tikslumo didinimas kartojant matavimus

Jūs galite padidinti prietaiso jautrumą (t.y. gebėjimą atlikti smulkesnės skalės matavimus) kartodami matavimus. Bendra taisyklė būtų maždaug tokia: jeigu tas pats dydis matuojamas N kartų, o vieno matavimo paklaida x procentų, tai išmatuoto dydžio netikslumas sumažėja $\sqrt{N}$ kartų, t. y. paklaida vidutiniškai sumažėja $x/\sqrt{N}$ kartų.

Vienetai ir dimensijos

Fizikiniai dydžiai gali turėti vienetus arba jų neturėti.

Tie dydžiai, kurie neturi vienetų, gali būti *sveikieji skaičiai*, pavyzdžiui, atomų skaičius bandinyje. Sveikaisiais skaičiais išreiškiami ir fizikinių dydžių su vienodais vienetais **santykiai**, pavyzdžiui, santykinis pailgėjimas yra pailgėjimo (išreikšto metrais) santykis su pradiniu ilgiu (išreikštu taip pat metrais).

Kai kurie santykiai gali būti lengvai pastebėti, nes jie vadinami santykiniais dydžiais. Pavyzdžiui, *santykinis tankis* (medžiagos tankio santykis su vandens tankiu) arba *santykinė dielektrinė* skvarba (elektrinės konstantos medžiagoje santykis su konstanta vakuume). Tokie dydžiai yra **bedimensiai dydžiai** – žodžiu „dimensija" vadinami fizikinių vienetų sąryšiai, kuriais išreiškiamas kokio nors fizikinio dydžio vienetas.

Patys bendriausi dimensiniai vienetai yra ilgis (L), masė (M) ir laikas (T). Apie dimensijas plačiau rašoma skyrelyje *Dimensijų metodo taikymas*.

Pagrindiniai fizikos dydžiai sudaro SI (*Système Internationale*) vienetų sistemą. Pavyzdžiui, ilgio dimensijos etaloninis vienetas yra metras, o masės dimensiją atitinkantis vienetas yra kilogramas. Visi fizikos dydžiai gali būti išreikšti septyniais **pagrindiniais vienetais** ir dviem **papildomais vienetais** (P3.2 lentelė).

P3.2 lentelė. **SI sistemos vienetai**

Dydis	Vieneto pavadinimas	Vieneto simbolis
Pagrindiniai vienetai:		
ilgis	metras	m
masė	kilogramas	kg
laikas	sekundė	s
elektros srovė	amperas	A
temperatūra	kelvinas	K
medžiagos kiekis	molis	mol
šviesis	candela	cd
Papildomi vienetai:		
kampas	radianas	rad
erdvinis kampas	steradianas	sr

P3.3 lentelė

Dydis	Vienetai
Plotas = (ilgis)^2	m^2
Greitis = ilgis/laikas	$m \cdot s^{-1}$
Pagreitis = greitis/laikas	$m \cdot s^{-2}$
Jėga = masė × pagreitis	$kg \cdot m \cdot s^{-2}$

Išvestiniai dydžiai

Visi kiti dydžiai išvedami pagal tam tikras taisykles naudojant aukščiau nurodytus pagrindinius vienetus. Keli pavyzdžiai pateikti P3.3 lentelėje.

Kai kurie išvestiniai dydžiai yra tokie svarbūs, kad jiems suteikiamas pavadinimas ir naujas sudėtinis vienetas. Pavyzdžiui, fizikos dydžio „jėga" vienetas yra pagrindinių vienetų $kg \cdot m \cdot s^{-2}$ derinys, dažniausiai vadinamas niutonu [N]. Taip daroma tam, kad būtų papraščiau. Įtampos ir srovės santykis vadinamas varža, ji apibrėžiama kaip $R = V/I$ ir matuojama omais [W]. Norint išreikšti omus pagrindiniais vienetais, pirmiausia reikia rasti volto išraišką. Voltas apibrėžiamas kaip džaulio ir kulono santykis: [V] = [J] / [C]. Džaulis yra jėgos ir atstumo sandauga, todėl:

džaulis = jėga × atstumas

arba $kg \cdot m \cdot s^{-2} \times m = kg \cdot m^2 \cdot s^{-2}$.

Kulonas taip pat yra išvestinis vienetas:

kulonas = srovė × laikas,

taigi kulonas, išreikštas pagrindiniais vienetais, lygus sandaugai $A \cdot s$.

Tada voltą pagrindiniais vienetais galima išreikšti taip:

$$\text{džauliai/kulonai} = \frac{kg \cdot m^2}{A \cdot s}.$$

Šią išraišką suprastinę, gauname $kg \cdot m^2 \cdot A \cdot s^{-3}$. Tada elektrinės varžos vienetai tokie:

$$\text{varža} = \text{voltai/srovė} = \frac{kg \cdot m^2\, A \cdot s^{-3}}{A} = kg \cdot m^2 \cdot s^{-3}.$$

Todėl daugelis paplitusių dydžių turi savus pavadinimus.

Žr. 1 klausimą.

Dimensijų metodo taikymas

Taikant dimensijas ir vienetus galima patikrinti, ar formulės ir lygtys yra teisingos, galima net išvesti kai kurias formules (skaitinio daugiklio tikslumu).

Pasiaiškinkime, kaip galėtų būti gaunamos apytikslės formulės nagrinėjant tik jų dimensijas. Tarkime, norime rasti svyruoklės svyravimų periodą. Pirmiausia spėjame, kad jis tikriausiai priklauso nuo svyruoklės ilgio, prikabinto kūno masės ir gravitacinio lauko stiprumo, t.y. laisvojo kritimo pagreičio g.

Tarkime, ieškomasis dydis T yra dydžių m, l, g funkcija: $T = f(m, l, g)$. Šios išraiškos kairiosios pusės vienetas yra tik sekundė [s]. Toliau bandome nustatyti svyravimų periodo priklausomybę nuo nurodytų dydžių formą. Žinome, kad kuo ilgesnė svyruoklė, tuo lėčiau ji svyruoja; be to, kuo svyruoklė sunkesnė, tuo ji turėtų greičiau svyruoti; didėjant gravitacinio lauko stiprumui (dydžiui g) svyruoklės judėjimas taip pat turėtų būti spartesnis. Dabar galime sujungti visus šiuos tris dydžius: ilgis/(masė × laisvojo kritimo pagreitis). Įrašę pagrindinius vienetus gauname:

$$\frac{m}{kg \times m \cdot s^{-2}} = \frac{s^2}{kg}$$

Gautoji išraiška, aišku, neteisinga: laikas negali būti matuojamas antruoju laipsniu $[T]^2$. Be to, kairėje pusėje nėra masės, vadinasi, periodas nuo jos nepriklauso. Pasirodo, dydžius l ir g galima sujungti vieninteliu būdu – per laiką, t.y. $\sqrt{(l/g)}$. Patikrinkite tai! Dabar abiejų lygties pusių vienetai sutampa. Gauta išraiška $T = \sqrt{(l/g)}$ taip pat nėra visiškai teisinga. Labai dažnai formulėse būna ir bedimensiai daugikliai. Tiksliai išvedę svyravimų periodo formulę gautume tokią išraišką: $T = 2\pi\sqrt{(l/g)}$.

Dabar išnagrinėkime dimensijų metodą. Kad būtų aiškiau, laiką pažymėkime T, ilgio vienetą l, o masę m. Kairiosios lygties pusės vienetas yra t. Kitoje pusėje gali būti ilgis $[l]$, g $[lT^{-}]$ ir masė $[m]$. Tada galima užrašyti tokią lygybę:

$$T = kl^x g^y m^z$$

kur k yra bedimensė konstanta.

Vietoj dydžių l, g ir m įrašome jų dimensines išraiškas:

$$T = kL^x (lT^{-2})^y \mathrm{m}^z = l^{(x+y)} T^{-2y} M^z.$$

Dabar galime rasti, kam lygūs laipsnių rodikliai x, y, ir z. Kadangi išraiškoje nėra masės vienetų, tai $z = 0$. Sulyginame laipsnių rodiklius ties T ir l:

T: $1 = -2y$,

L: $0 = x + y$.

Gauname, kad $y = -½$, o $x = -y = ½$.

Įrašome gautąsias vertes ir gauname svyravimų periodo formulę:

$$T = k\, l^{½} g^{y\, ½} = k\sqrt{(l/g)}.$$

Žr. 2 klausimą.

Eksperimentai ir dalyvavimas pamokose

Žemiau pateiktas sąrašas darbų, daugiausia laboratorinių, kuriuos jūs galėtumėte atlikti pamokų metu. Kai kurie jų yra svarbūs – pagal mokymosi programą išsiaiškinkite, ko iš jūsų reikalaujama. Sąrašas yra ilgas, todėl tikriausiai nesuspėsite visų padaryti. Kai kuriuos eksperimentus gali pademonstruoti mokytojas.

Pagrindinių prietaisų naudojimas

Išklausę fizikos kursą turite mokėti naudotis tokiais matavimo prietaisais ir įrenginiais:

a) Bendrieji

ilgio matuokliai (metrinės ir milimetrinės liniuotės, sukamasis mikrometras, slankusis mikroskopas, nonijaus skalė)
sekundometras
elektroninis laikrodis
greičio matuokliai
jėgos matuokliai (niutonmetrai)
svarstyklės (pavyzdžiui, elektroninės)
termometrai

b) Elektriniai

ampermetrai ir voltmetrai (analoginiai ir /arba skaitmeniniai)
multimetras
oscilografas
varžynas
talpynas
elektrometras arba kitas prietaisas mažų srovių ir krūvių matavimui
elektros srovės šaltiniai (žemos įtampos, aukštos įtampos)
radioaktyvumo detektoriai
generatoriai
elektrinių dydžių matuokliai ir savirašiai (naudojami su kompiuteriais)
3 cm bangolaidžai

A. Demonstraciniai (mokomieji) eksperimentai

Medžiaga ir jos savybės

Metalų struktūros tyrimas
Medžiagų (pvz., polietileno, vario) tempimo ir nutrūkimo stebėjimas
Jėgų poveikio įvairioms medžiagoms (pvz., popieriui, vielai, plastikui, metalui) stebėjimas
Sudėtinių ir vienelemenčių medžiagų palyginimas
Jėgos skysčiuose: slėgis ir gylis; paviršiaus įtempimas
Skysčių tekėjimas ir klampa
Pagreičio matavimas
Tamprieji ir netamprieji susidūrimai
Kampinio greičio, pagreičio ir judesio kiekio tvermės tyrimas
Boilio dėsnis
Dujų dėsniai (kaip slėgis ir tūris priklauso nuo temperatūros)
Skysčių tekėjimo tyrimas (laminarinis ir turbulencinis tekėjimas, Stokso dėsnis, Bernulio principas)

Šiluminė fizika

Natūralaus aušimo tyrimas
Karštų kūnų skleidžiamo infraraudonojo spinduliavimo stebėjimas
Temperatūros kitimo laike nustatymas keičiantis būsenai
Termistoriaus kalibravimas

Elektra ir magnetizmas

Jonų judėjimas skystyje
Lygiagretus ir nuoseklus rezistorių jungimas
Įtampos daliklio veikimas
Ryšys tarp kondensatoriaus įtampos ir krūvio
Kondensatoriaus įkrova ir iškrova per rezistorių
Lygiagretusis ir nuoseklusis kondensatorių jungimas
Voltamperinė termistorių, diodų, lempų ir kitų prietaisų (pvz., naudojant kompiuterinį duomenų matuoklį) charakteristika
Elektrinio lauko linijos
Ekvipotencialiniai paviršiai aplink dielektrikus
Magnetinių domenų tyrimas
Įmagnetėjančios medžiagos ir diamagnetikai
Magnetiniai laukai apie laidininkus su srove: tiesus laidas, uždara grandinė
Magnetiniame lauke esantį laidininką su srove veikianti jėga
Mažų elektrinių variklių veikimas ir naudingumo koeficientas
Holo efektas: Holo zondo panaudojimas magnetiniams laukams tirti
Indukuotoji įtampa ir elektromagnetinės indukcijos dėsniai
Induktyvumo veikimas: laikas, per kurį nusistovi stabili srovė; srovės ir induktyvumo priklausomybė nuo dažnio
Matavimai kintamosios srovės grandinėje su L, C, ir R elementais
Fazių skirtumas LCR grandinėje

Mikroelektronika

Loginių elementų veikimo principas, teisingumo lentelės
Užduočių vykdymas naudojant loginius elementus
Nestabilių ir dviejų būsenų grandinių kūrimas

Bangos ir svyravimai (įskaitant šviesą ir optiką)

Paprastosios svyravimų sistemos stebėjimas (prie spyruoklės prikabinta masė, matematinė svyruoklė)
Rezonansas
Surištosios sistemos (svyruoklės, spyruoklės) – mušimai ir rezonansas
Kas sąlygoja bangos spyruoklėje sklidimo greitį
Išilginės ir skersinės bangos spyruoklėje
Obertonai vibruojančioje stygoje
Bangų atspindys
Stovinčiosios garso bangos uždarame vamzdyje
Interferencijos ir difrakcijos stebėjimas vandens bangų vonelėje
Šviesos difrakcija ir interferencija: Jungo plyšiai, oro tarpai, Loido atspindžiai
Difrakcinės gardelės savybės
Mikrobangų difrakcija ir interferencija
Šviesos poliarizacijos stebėjimas

Temperatūros įtaka kaitrinės lempos spektrui
Spektrų stebėjimas – emisijos ir absorbcijos linijos
Atvirkštinio kvadrato dėsnio tyrimas su šviesa
Šviesos lūžimo tyrimas: pilnasis vidaus atspindys, dispersija, šviesos sklidimas optine skaidula (šviesolaidžiu)
Atvaizdų gavimo lęšiais tyrimas
Paprastų optinių prietaisų veikimo tyrimas

Atominė ir paprastų dalelių fizika

Katodinių spindulių stebėjimas: elektrinių ir magnetinių laukų poveikis
Įrodymas, kad elektronai turi krūvį
Elektronų difrakcijos stebėjimas
Fotoelektrinio efekto stebėjimas
Emisijos ir absorbcijos spektrų stebėjimas
Alfa dalelių registravimas burbuliukų kameroje
Alfa dalelių sklaidos stebėjimas
Geigerio ir Miulerio vamzdelio veikimas kintant anodo įtampai
Foninio radioaktyvumo matavimas
Jonizuojančiosios spinduliuotės skvarbos tyrimas
Atvirkštinio kvadrato dėsnio tyrimas su gama spinduliais

Astronomija ir astrofizika

Žvaigždžių ir planetų stebėjimas ir atpažinimas
Kaitinamojo vielos siūlelio spalvos ir spektro kitimo stebėjimas
Relėjaus sklaidos stebėjimas
Teleskopų naudojimas ir jų savybių įvertinimas (regėjimo laukas, didinimas)
Vienelemenčių medžiagų emisijos spektrų stebėjimas
Teleskopų didinimas

B. Medžiagų savybių nustatymas

Jūs turite mokėti aprašyti eksperimentus, kuriais nustatomi nurodytieji dydžiai

Medžiagų mechanika

Skysčių ir kietųjų kūnų tankiai
Spyruoklės tamprumo konstanta
Jungo modulis
Laisvojo kritimo pagreitis
Vilkelio judesio kiekio momentas
Šiluminė fizika
Specifinė šiluminė talpa: kietųjų kūnų, skysčių
Dujų specifinės šilumos: C_p ir C_v
Savitoji lydymosi ir garavimo šiluma
Gero ir blogo laidininko šiluminis laidumas

Elektra ir magnetizmas

Laidininko elektrinė varža
Metalo ir puslaidininkio elektrinė varža
Elektros srovė
Krūvis
Galia
Joninio tirpalo laidumas
Kulono konstanta $1/4\pi\varepsilon_0$
Elektrinė talpa
Saviindukcija
Kintamosios srovės grandinės reaktyvinė varža
Magnetinio lauko stiprumas
Elektrinio lauko stiprumas

Bangos ir svyravimai (įskaitant šviesą ir optiką)

Garso bangų greitis ore, anglies diokside, metale
Lęšių ir išgaubtųjų (įgaubtųjų) veidrodžių židinio nuotolis
Šviesos greitis (ore arba optinėje skaiduloje)
Šviesos bangos ilgis: Jungo plyšiai ir/arba difrakcinė gardelė

Atominė ir dalelių fizika

Elektrono krūvio ypatumai
Elektrono krūvis (Milikeno bandymas)
Planko konstanta
Pusėjimo trukmė (taip pat analogiški eksperimentai)
Alfa spinduolio aktyvumas

C. Tyrimai

Jūs turite žinoti pagrindinius mokslinio tyrimo etapus.

Planavimas ir kūrimas: turite gebėti numatyti nagrinėjamo modelio ar hipotezės rezultatus, nustatyti svarbiausius matuojamus parametrus, pasirinkti tinkamus matavimo prietaisus ir matavimų sritį, pasirūpinti eksperimento saugumu.
Matavimų atlikimas ir rezultatų registravimas: turite mokėti saugiai dirbti ir kvalifikuotai naudotis prietaisais, kad gautumėte duomenis būtinu tikslumu, vartoti tinkamus vienetus, juos aiškiai pažymėti; naudoti lenteles ir grafikus; mokėti modifikuoti nesudėtingų eksperimentų atlikimo eigą.
Duomenų analizė: turite mokėti sinaudotis grafikais ir matematiniais skaičiavimais, nustatyti matavimų tikslumą, pastebėti fizikinių dydžių kitimo dėsningumus, palyginti gautus rezultatus su teorinėmis prognozėmis, pateikti darbo išvadas aiškia ir taisyklinga kalba.
Eksperimento eigos ir rezultatų įvertinimas: turite gebėti įvertinti gautų galutinių rezultatų ir išvadų svarumą ir pagrįstumą, jų tikslumą bei patikimumą, pastebėti taikomo metodo privalumus ir trūkumus bei pasiūlyti galimus būdus patobulinti tyrimo metodą.

Šiame vadovėlyje nėra galimybės nurodyti visus įdomius tiriamuosius darbus. Pagal pateiktą sąrašą galima tik orientuotis, kokio pobūdžio tyrimai galėtų būti atlikti.
Kaip oro pasipriešinimas veikia nusviesto kamuoliuko judėjimą?
Kaip temperatūra veikia kamuoliuko atšokimą nuo sienos ir kodėl?
Kas atsitinka, kai varis „veikiamas šiluma"?
Fotoblykstės veikimo nuotolis.
Dviračio naudingumo koeficientas.
Polietileno tempimas.
Chaotiškas lašėjimo iš čiaupo pobūdis.
Kintamųjų žvaigždžių spindesio kitimas.
Betono tvirtumas.
Ryšys tarp balione esančio oro slėgio ir tūrio.
Oro judėjimas šildomoje patalpoje.
Langų ir sienų šiluminis laidumas.
Rašalo difuzija vandenyje.
Sklandytuvo modelio sklendimo tyrimas.
Bangelių vandens paviršiuje sklidimo greitis.
Kas lemia žmogaus akies skiriamąją gebą?
Beta dalelių sklaida skirtingose medžiagose.
Radonas patalpose.
Elektros baterijų veikimo trukmė ir jų naudojimas.
Išsklaidytos arba atsispindėjusios šviesos poliarizacija.
Laminarinis ir turbulentinis skysčių tekėjimas.
Žmogaus kūno šilumos praradimas.
Rezistorinio termometro konstravimas ir naudojimas.
Naujų pakavimo medžiagų šiluminės ir mechaninės savybės.
Nedidelio transformatoriaus naudingumo koeficientas.

Modeliavimas

Reikia neužmiršti, kad daugelis sudėtingų arba/ir pavojingų fizikos eksperimentų, pavyzdžiui, astronomijoje arba branduolinėje fizikoje, gali būti atlikti kompiuteriais. Naujesnių pavyzdžių paklauskite mokytojo. Jūs patys taip pat galite sukurti kompiuterinį eksperimentą naudodamiesi dinamine duomenų lentele, kaip aprašyta 2 priede. Tačiau toks bandymas neatstoja realių eksperimentų. Kompiuterį naudokite jau atliktam bandymui praplėsti – kompiuteryje keisdami atitinkamus parametrus ir konstantas, ištyrinėkite, kaip keistųsi laboratorinio darbo rezultatai.

Užduotys

1 Išreikškite pagrindiniais vienetais:
a) slėgį,
b) tūrį,
c) kampinį greitį,
d) tankį,
e) vatą,
f) gravitacinę konstantą *G*.

2 Patikrinkite, ar žemiau pateiktų formulių dimensijos yra teisingos, t. y. ar atitinka abiejų lygybės pusių dimensijos:
a) galia $P = VIt$,
b) įcentrinis pagreitis $a = v^2/r$,
c) bangos greitis stygoje $v = \sqrt{(T/\mu)}$; čia T yra įtempis, o μ yra stygos ilgio vieneto masė.

4 PRIEDAS: DOPLERIO EFEKTAS

Doplerio efektu vadinamas bangų (garso, šviesos ar kitokių) dažnio pokytis, atsirandantis dėl šaltinio ir imtuvo judėjimo vienas kito atžvilgiu. Pavyzdys gali būti gerai visiems žinomas ir tikriausiai ne kartą stebėtas automobilio signalo, ypač policijos arba greitosios pagalbos sirenos, dažnio pasikeitimas, jam pravažiuojant pro jus. Turbūt pastebėjote, kad signalo dažnis didėja automobiliui judant link jūsų ir mažėja jam tolstant. Šis efektas panaudojamas automobilių greičiams matuoti; juo naudojantis galima taip pat išmatuoti ir tolimų žvaigždžių, galaktikų ar kitokių objektų judėjimo Žemės atžvilgiu greičius.

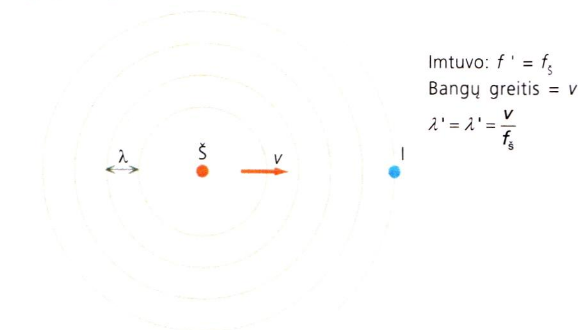
Atsiminkite:

periodas yra atvirkščiai proporcingas dažniui $T = 1/f$

bangų greitis lygus bangų ilgio ir dažnio sandaugai $v = f\lambda$

Doplerio efektas garso bangoms

P4.1a) pav. parodytos šaltinio Š išspinduliuotos garso bangos, kurių greitis v ir dažnis $f_š$. Kai imtuvas ir šaltinis nejuda vienas kito atžvilgiu, tokio pat dažnio banga, kaip ir skleidžiamoji, patenka ir į imtuvą. Be to, mes remiamės prielaida, kad aplinka, kurioje sklinda tas garsas, yra oras, ir jis taip pat nejuda.

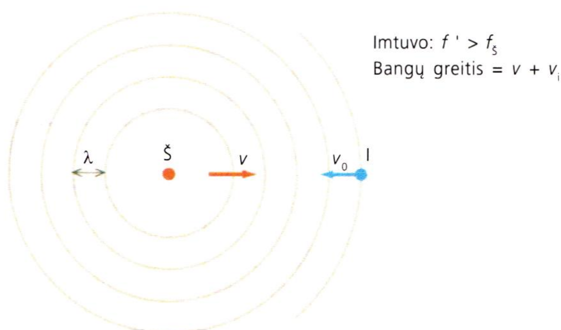


P4.1a) pav. **Ir šaltinis, ir imtuvas parimę**

1. Nejudantis šaltinis ir judantis imtuvas

Panagrinėkime dabar situaciją, kai *imtuvas* greičiu v_i juda link parimusio šaltinio, kaip parodyta P.1b) pav.

Žinoma, imtuvui judant paties garso savybės niekaip nesikeičia, tačiau judantis imtuvas per sekundę kerta daugiau bangų nei būdamas parimęs. Jam regis, kad garso greitis, o tuo pačiu ir jo dažnis, padidėja. Jo atžvilgiu bangos šiuo



P4.1b) pav. **Parimęs šaltinis ir judantis imtuvas**

atveju juda greičiu $v + v_i$, todėl dažnis garso, kurį jis fiksuoja, pakinta ir tampa lygus f'.

Pagal bangos formulę

$$v + v_0 = f' \text{ arba } f' = (v + v_0)/\lambda$$

Dažnis, kurį skleidžia šaltinis, yra $f = v/l$, taigi dažnių santykis:

užregistruotas dažnis / šaltinio dažnis =

$$\frac{f'}{f} = \frac{v + v_0}{v} = 1 + \frac{v_0}{v} \quad [1]$$

Jei imtuvas juda tolyn nuo šaltinio, dažnis mažėja, nes imtuvas per sekundę kerta mažiau bangų, todėl formulė tampa tokia:

$$\frac{f'}{f} = 1 - \frac{v_0}{v} \quad [2]$$

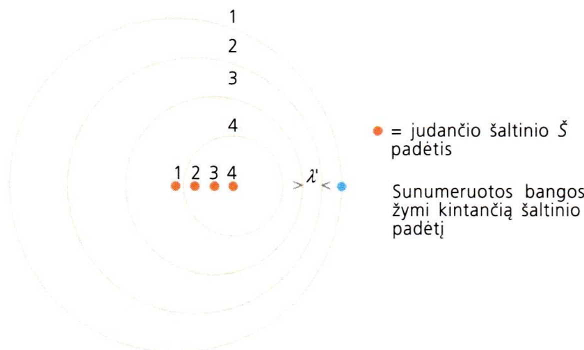
Formulę galima užrašyti taip:

$$f' = f\left(1 \pm \frac{v_0}{v}\right) \quad [3]$$

2. Parimęs imtuvas ir judantis šaltinis

P4.2 pav. parodyta, kas atsitinka, kai parimusio imtuvo atžvilgiu pastoviu greičiu v_i juda pats šaltinis.

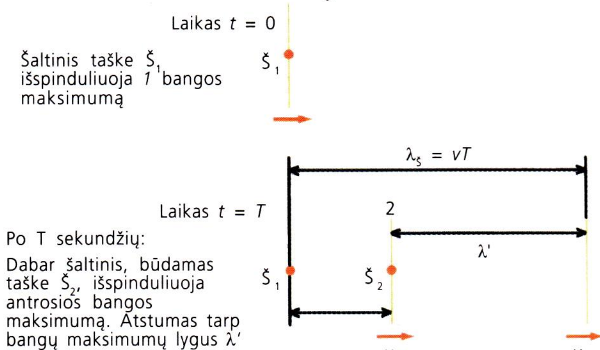
Jei šaltinis artėja prie imtuvo, efektas pasireiškia tuo, kad į erdvę tarp jų patenka daugiau bangų nei tuo atveju, kai jie abu yra parimę, P4.1a) pav. Dėl to imtuvo fiksuojamas dažnis vėl išauga, nes dabar per sekundę pro jį sklinda daugiau



P4.2 pav. **Judantis šaltinis, parimęs imtuvas**

bangų. Bangos juda tuo pačiu greičiu, todėl imtuvo užregistruotas dažnis f' atitinka lygtį $v = f'\lambda'$, o tai reiškia, kad

$$\lambda' = \frac{v}{f'}$$



P4.3 pav. **Doplerio efektas, kylantis dėl šaltinio judėjimo. Pažymėti tik bangų maksimumai**

Naujojo bangos ilgio vertę galite rasti naudodamiesi P4.3 pav. Per laiką t, kuris lygus virpesių periodui, banga nusklinda atstumą vt. Per tą laiką šaltinis pasislenka atstumu $v_{š}t$, todėl sekanti banga priartėja prie ankstesniosios, o jos ilgis tiek pat sumažėja. Vadinasi:

$l' = vt - v_{š}t$

Kadangi periodas $T = 1/f$, o $\lambda' = v/f'$, tai galima užrašyti:

$$\frac{v}{f'} = \frac{v}{f} - \frac{v_{š}}{f} = \frac{1}{f}\left(v - v_{š}\right)$$

arba kitokiu pavidalu:

$$f' = f\left(\frac{v}{v - v_{š}}\right)$$

Įprasta tai pateikti šitaip:

$$f' = f\left(\frac{1}{1 - \frac{v_{š}}{v}}\right) \qquad [4]$$

Tai vėl patvirtina, kad šaltiniui judant link imtuvo (t. y., kai $v_{š}$ yra teigiamas) užregistruotas dažnis yra aukštesnis. Šaltiniui judant tolyn nuo imtuvo, formulė pakinta:

$$f' = f\left(\frac{1}{1 + \frac{v_{š}}{v}}\right) \qquad [5]$$

taigi vėl paaiškėja, kad f' mažesnis nei f.

3. Juda abu – ir šaltinis, ir imtuvas

Kai juda ir šaltinis, ir imtuvas, užregistruotas dažnis yra toks:

$$f' = f\left(\frac{v \pm v_0}{v \pm v_{š}}\right) \qquad [6]$$

Čia greičių ženklai yra tokie, kad
+ v_i atitinka situaciją, kai imtuvas juda link šaltinio,
– v_i atitinka situaciją, kai imtuvas tolsta nuo šaltinio,
– $v_{š}$ atitinka situaciją, kai šaltinis juda link imtuvo,
+ $v_{š}$ atitinka situaciją, kai šaltinis tolsta nuo imtuvo.

Įsitikinkite, kad ši formulė atitinka ankstesniąsias formules [2], [3], [4] ir [5], kai parenkamos reikiamos v_i ir $v_{š}$ vertės. Taip pat turėkite galvoje, kad ženklai + ir – turi būti parinkti taip, kad bet kuriuo atveju atstumui tarp šaltinio ir imtuvo mažėjant dažnis didėtų, o jam didėjant – mažėtų.

B. Doplerio efektas elektromagnetinėms bangoms

Viena pagrindinių idėjų, kuria remiasi specialioji reliatyvumo teorija, yra ta, kad jei du kūnai juda vienas kito atžvilgiu pastoviu greičiu, tai neįmanoma nustatyti, kuris jų, o gal ir abu kartu, juda. Svarbus tik santykinis jų judėjimo greitis. Taigi formulė turi būti ta pati ir tuo atveju, kai „šaltinis juda, imtuvas parimęs“, ir antruoju atveju, kai „šaltinis parimęs, imtuvas juda“. Be to, šviesos greitis visų objektų atžvilgiu, nepriklausomai nuo jų judėjimo greičių, turi būti toks pats.

Absoliutaus reliatyvistinio Doplerio efekto išvedimas yra pernelyg sudėtingas, kad galėtume jį čia pateikti, bet tuo atveju, kai šaltinio ir imtuvo santykinio judėjimo greitis yra daug mažesnis už šviesos greitį, išraiška yra gana paprasta:

$$f' = f\left(1 + \frac{v}{c}\right) \qquad [7]$$

Kartais tai pateikiama kaip bangų ilgių santykis. Kadangi $v = f'\lambda' = f\lambda$, tai

$$\frac{\lambda'}{\lambda} = \frac{f}{f'} = \frac{1}{\left(1 + \frac{v}{c}\right)} = \frac{c}{c + v} \qquad [8]$$

Daugelyje taikymų matuojamas skirtumas Δf tarp skleidžiamo ir registruojamo dažnių, todėl lygtis [7] naudojama šitokio pavidalo:

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{v}{c} \qquad [9]$$

Doplerio poslinkis judančiam reflektoriui

Naudojant radarą automobilio greičiui matuoti reikia atsižvelgti dar ir į bangų atspindžio keliamą efektą. Tokiu atveju [9] lygtis pakinta:

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{2v}{c} \qquad [10]$$

Daugiklis 2 čia atsiranda dėl to, kad judant reflektoriui, sukuriamas jame vaizdas juda du kartus greičiau.

Užduotys

Pažvelkite į P4.3 pav. Papildykite schemą – nurodykite trijų bangų padėtis laiko momentu $t = 2T$. Įsitikinkite, kad λ' išlieka nepakitęs.

Pabandykite algebriškai taip pertvarkyti lygtį [7], kad ji taptų formule [9].

ATSAKYMAI Į KLAUSIMUS

16 SKYRIUS

Kontroliniai klausimai

E b) 3 cm arba daugiau
G 2 milijonus kartų
H 6×10^{-8} radianų

Klausimai skyriaus pabaigoje

3 b) 2×10^8 m · s^{-1} , c) 1,5
6 b) ~10
9 b) ~10
10 23°, 51°
11 a) $3{,}6 \times 10^{-4}$ rad
b) tik tiek!
12 1,3
13 $1{,}8 \times 10^{-4}$ rad
b) (i) 1/16, **(ii)** 4,
c) 3°

17 SKYRIUS

Kontroliniai klausimai

A 160 W · m^{-2}, 2×10^{16} W · m^{-2}

Klausimai skyriaus pabaigoje

2 a) 9×10^{-6} m,
b) 1,1 kW
3 a) 12 000 K,
b) $9{,}7 \times 10^{-7}$ m
4 5200 K
6 a) (i) 1×10^{-18} J,
(ii) 3×10^{-19} J,
(iii) 1×10^{-19} J,
(iv) 2×10^{-23} J
7 ~ 4×10^{18}
9 b) 10^{15} Hz,
d) $1{,}06 \times 10^{19}$ J
13 c) 5,7°,
d) (i) $2{,}7 \times 10^{-11}$ m,
ii) 5×10^{-6} rad (3×10^{-4} laipsnių)
14 a) $1{,}03 \times 10^{-11}$ m,
b) 4×10^{-34} J · s
16 a) $4{,}6 \times 10^{-24}$ N · s
b) $1{,}4 \times 10^{-10}$ m
18 a) 2×10^{-10} m,
b) $3{,}3 \times 10^{-24}$ N · s,
c) 6×10^{-18} J,
d) 5×10^{-18} J

18 SKYRIUS

Kontroliniai klausimai

E 7×10^{-15} m
F 5×10^{-14} m
H a) (i) $3{,}2 \times 10^{-19}$ J, **(ii)** $6{,}4 \times 10^{-13}$ J,
b) (i) 6,8 MeV, **(ii)** $1{,}6 \times 10^{20}$ eV
I 250 T
K $7{,}2 \times 10^{10}$ J
M apie 12 000

Klausimai skyriaus pabaigoje

5 a) $3{,}0523 \times 10^{-30}$ kg, **b) (i)** $2{,}75 \times 10^{-13}$ J, **(ii)** 1,72 MeV
6 194 MeV
8 a) 2 mT, **b)** ^{20}Ne 10,4 m, ^{21}Ne 10,9 m, ^{22}Ne 11,4 m
10 $4{,}5 \times 10^{-15}$ m
11 $1{,}5 \times 10^{17}$ kg · m^{-3}
15 a) (i) 650 s^{-1} **(ii)** 0,6 s^{-1}
16 a) $1{,}5 \times 10^{12}$ s^{-1}, **b)** 280 s
19 b) $1{,}8 \times 10^{-5}$ s^{-1}, **c)** $1{,}8 \times 10^{-5}$ s^{-1},
d) $3{,}9 \times 10^4$ s
21 a) ~125 s^{-1}, **b)** 8×10^{-4} kg, **c)** 3×10^{-12} s^{-1}, **d)** $6{,}5 \times 10^{13}$, **e)** $1{,}45 \times 10^{-12}$ kg, **f)** $6{,}9 \times 10^{11}$ (^{12}C iki ^{14}C)

19 SKYRIUS

Kontroliniai klausimai

B a) 6×10^{-7} m, **b)** (i) 4×10^{-7} m, **(ii)** 1,33
E a) –14,5 dioptrijų, +34,5 dioptrijų, **b)** +20 dioptrijų, **c)** 50 mm
G 1,3 m, 0,93 m
I 2,8 m, 1,9 m × 2,5 m
K ×30
P a) apie 2,5 cm
S b) (i) $6{,}6 \times 10^{-23}$ N · s, **(ii)** $2{,}4 \times 10^{-15}$ J, **c)** 15 kV

Klausimai skyriaus pabaigoje

5 a) 50,21 mm, **b)** 8,6 m
8 b) (i) 7,4 mm, **(ii)** 29×10^{-3} rad, **(iii)** 3,2, **c) (i)** 0,85 m, **(ii)** 16, **(iii)** 0,15 rad
10 a) 24, **b)** 13
11 0,32 rad

20 SKYRIUS

Kontroliniai klausimai

A 8 m, 4 m, 2,67 m, 2,5 m
C 10^6 s, 10^{11}m
D $1{,}60 \times 10^{19}$ J
E 4×10^{19}, $6{,}5 \times 10^{-10}$
N 63 mm

Klausimai skyriaus pabaigoje

1 $1{,}1 \times 10^{-4}$ m · s^{-1}
4 $3{,}4 \times 10^{21}$ m^{-3}
6 0,32 nC, 0,64 nC
7 a) $1{,}1 \times 10^{-4}$, **b)** 13 nC, **c)** 2,4 pF, 5,5 kV

21 SKYRIUS

Kontroliniai klausimai

A a) 1500 m, 300 m, 3 m, 0,6 m, 3 cm, **b)** 1,5 MHz, 3,75 MHz, 150 MHz, 1,5 GHz, 30 GHz
B 1,001 MHz, 0,999 MHz
C 1,1 MHz
D 110 stočių
E 133 stočių
F 5 bitai, 6 bitai, 7 bitai
I $4{,}3 \times 10^9$ kvantavimo lygių

Klausimai skyriaus pabaigoje

2 a) 2 kHz, **b) (i)** 300 Hz, 1 MHz, 0,9997 MHz, 1,0003 MHz, **(ii)** 3,4 kHz, 1 MHz, 0,9966 MHz, 1,0034 MHz, **d)** 6,8 kHz, **e)** apie 58 stotis, **f)** ne daugiau kaip 10 stočių
3 c) (i) 20 stočių
5

Laikas	0	1	2	3	4	5	6	7
Dvejetainis kodas	1011	1101	1000	0001	0100	0010	0010	1111
Skaitmeninis išėjimo signalas	1 / 0							

6 impulsų dažnis 1 kHz, maksimalus dažnis 500 Hz, **a)** 125 ms,
d) 2 imtys per periodą
7 a) 256, **b)** 125 ms
8 a) 16, **b) (i)** 2^{16} = 65536 lygiai
9 a) 8000 impulsai s^{-1}, **b)** 64 kbit · s^{-1}
c) 2048 kbit · s^{-1} = 2 Mbit · s^{-1},
d) 2048, **e)** 131 072 000,
f) per 78 000
10 a) 256 lygiai, **c)** 125 ms

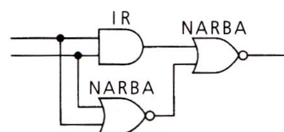
22 SKYRIUS

Kontroliniai klausimai

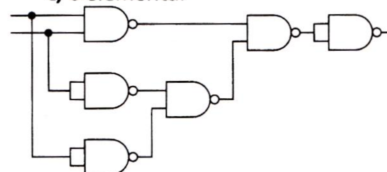
H 50 mV
I 10^9 kartų
J +10
K 90 kW
L 0,18 V
N (sunku gauti vieną vertę!!) 0,5 MHz: L = ~ 300 mH, dažnis = 1,5 MHz: L = ~60 mH

Klausimai skyriaus pabaigoje

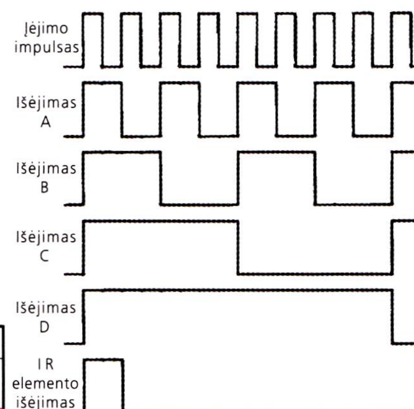
1 a) 2 įėjimų NIR, **b)** 3 IR
c) 2 įėjimų išskirties ARBA
d) 2 įėjimų palyginimo elementas arba komparatorius
2 a)



b) NARBA, du naudojami kaip NE,
c) 6 elementai



3 a) (i) 2 įėjimų palyginimo elementas, arba komparatorius
(ii) signalo lygis išlieka „aukštas"
b) taip pat kaip K2c) atveju, tik be paskutinio elemento
4 2 įėjimų IR, 2 įėjimų išskirties ARBA
5



6a) 91 nA, 91 μV,
b) (i) 0 V, Žemės potencialas,
(ii) 10 nA, **(iii)** 1,0 mV,
a) prijungti kitą keitiklį (įtampa taške F būtų +1mV)
7 a) +3 V, **b)** +11 V, **c)** –2 V
8

Laikas	0	1	2	3	4
V_B/V	0	0	6	0,7	0

9 a)

Stiprintuvas	Neinvertuojantis įvadas
A	4 V
B	3 V
C	2 V
D	1 V

b)

Analoginio signalo įtampa	Stiprintuvo išėjimas
	A B C D
0	1 1 1 1
1	0 1 1 1
2	0 0 1 1
3	0 0 0 1
4	0 0 0 0

c) 1,5 V išėjimas yra 0111, 4,5 išėjimas yra 0000

10 a)

Įėjimo aukštas lygis	Išėjimo įtampa
A	2,50 V
B	1,25 V
C	0,63 V
D	0,31 V

b)

Dvejetainis įėjimo signalas	Analoginė išėjimo įtampa (V)
0000	0,00
0001	0,31
0010	0,63
0011	0,94
0100	1,25
0101	1,56
0110	1,88
0111	2,19
1000	2,50
1001	2,81
1010	3,13
1011	3,44
1100	3,75
1101	4,06
1110	4,37
1111	4,69

c) X 1001, Y 0110, Z 1101
d) 32 lygių signalui gauti reikia 5 bitų skaitmeninio signalo ir papildomo įėjimo rezistoriaus, kurio varža $32R$

23 SKYRIUS

Kontroliniai klausimai

G a) 4×10^{13} J · s^{-1},
b) ~1/4
H a) 463,84 m · s^{-1},
b) 0,033731 N,
c) $3{,}4396 \times 10^{-3}$
I 0,4

Klausimai skyriaus pabaigoje

1 b) 8×10^4 K
2 a) 36 000, **b)** $7{,}6 \times 10^8$ m,
c) 33 km
12 1,7 valandos

24 SKYRIUS

Kontroliniai klausimai

B 15,4 MHz
D 0,15

Klausimai skyriaus pabaigoje

3 75 mm · s^{-1}
4 ~ 0,15 mm
6 $8{,}25 \times 10^{-12}$ m
9 a) 32,4 m^{-1}, **b)** 71 mm

25 SKYRIUS

Kontroliniai klausimai

B 1,3
C b) (i) 600 m, **(ii)** 9 km
F Jūs pasunkėtumėte ~22 kartus

Klausimai skyriaus pabaigoje

2 a) 3×10^8 m · s^{-1}
3 a) $2{,}6 \times 10^8$ m · s^{-1},
b) 0,5 m
5 a) 0,7 μs,
b) 210 m
7 b) 3×10^8 m · s^{-1},
c) 10^{-5} šm (~10^{11} m),
d) (i) 10^5 metų, **(ii)** $^{10-}5$ metų (apie 5 min.)
9 a) $2{,}09 \times 10^{-30}$ kg,
b) $5{,}64 \times 10^{-22}$ N · s
11 a) $4 - 10^{-15}$ J,
b) 4×10^{-15} J

12 a) (ii) $1{,}51 \times 10^{-8}$ J, **(ii)** $1{,}49 \times 10^{-8}$ J,
b) (i) $8{,}20 \times 10^{-12}$ J, **(ii)** $8{,}12 \times 10^{-12}$ J

26 SKYRIUS

Kontroliniai klausimai

F 3×10^{-23}s
K 8×10^{-21} s
P 50 kartų
R 75

Klausimai skyriaus pabaigoje

2 a) $2{,}4 \times 10^{-13}$ J, **b)** 1,5 MeV
3 a) $1{,}5 \times 10^{-10}$ J, **b)** 0,9 GeV
4 a) 0,51 MeV/c^2, **b)** 0,00051 GeV/c^2
24 a) 74 mm, **b)** 3,2 m
28 a) 0, **b)** 9,4 GeV, **c)** 9,4 GeV/c^2
29 a) $1{,}3 \times 10^7$ m · s^{-1}, **b)** $3{,}1 \times 10^5$ m · s^{-1}

27 SKYRIUS

Kontroliniai klausimai

D b) 2×10^{30} kg
I $6{,}1 \times 10^{18}$ m^2
K 5800 K
O ~100 km
R a) (i) 2 kpc, **(ii)** 2×10^7 av

Klausimai skyriaus pabaigoje

6 Ganimedo 7,2 paros, Kalisto 17 parų
18 a) stiprinimas $2{,}7 \times 10^5$
22 a) 1,3 pc,
b) 4,3 šm.
24 a) 32,7 av
b) 246 metai
29 Kapelos – 0,49, Rygelio – 8,0, Prokiono +2,7
36 a) (i) 0,200000 kartų per sekundę
(ii) 0,62831853 rad · s^{-1}
b) (i) $6{,}31 \times 10^{38}$ J, **(ii)** 0,62769021 rad · s^{-1}
c) $I = 1{,}6 \times 10^{42}$ kg · m^2,
d) 4×10^{34} kg

28 SKYRIUS

Klausimai skyriaus pabaigoje

9 (i) 4,25 km · s^{-1}, **(ii)** 43 km · s^{-1},
(iii) 85 km · s^{-1}, **(iv)** $8{,}5 \times 10^3$ km · s^{-1}
4 1,6 Mpc
7 a) 3 Mpc
11 a) 1, **b)** 12, **c)** 25%, **d)** 75%

Ken Dobson, David Grace, David Lovett

FIZIKA

II DALIS

Viršelio dailininkė *Raimonda Bateikaitė*
Redaktorė *Julija Rita Klimkienė*
Korektorė *Rita Martišienė*
Kompiuteriu maketavo *Arūnas Šlikas*

Užsakymas 2.679
Išleido leidykla „Alma littera“, A. Juozapavičiaus g. 6/2, 2005 Vilnius
Interneto svetainė: www.almali.lt.
Spaudė AB spaustuvė „Spindulys“, Gedimino g. 10, 3000 Kaunas
Interneto svetainė: www.spindulys.lt

UDK 53(075.3)
Do–51

Versta iš PHYSICS
by *Ken Dobson, David Grace, David Lovett*
HarperCollins Publishers Ltd, London

Lietuvos Respublikos švietimo ir mokslo ministerijos
rekomenduota 2001 02 09 Nr. 120

Iš anglų kalbos vertė
prof. habil. dr. *Gintautas P. Kamuntavičius*
ir dr. *Arvydas Kanapickas*

Redaktorė
Julija Rita Klimkienė

ISBN 9955–08–188–0 (2 dalis)
ISBN 9955–08–106–6 (bendras)